



Durabilité d'un assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique

Louisa Loulou

► To cite this version:

Louisa Loulou. Durabilité d'un assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique. Autre. Université Paris-Est, 2013. Français. NNT : 2013PEST1123 . pastel-00952884

HAL Id: pastel-00952884

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00952884>

Submitted on 27 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

UNIVERSITÉ PARIS-EST

Par Louisa LOULOU
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Structure et Matériaux

Durabilité de l'assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique

Soutenue le 6 septembre 2013

JURY :

Joseph GRIL
Yves BERTHAUD
Emmanuel FERRIER
Jean Luc COUREAU
Sylvain CHATAIGNER
Sabine CARÉ
Robert LE ROY

Directeur de Recherche, CNRS/Montpellier
Professeur, université Paris VI
Professeur, université de Lyon
Maître de conférences, université de Bordeaux
Ingénieur TPE, IFSTTAR Nantes
Directeur de Recherche, IFSTTAR
Professeur, ENSAPM

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Invité
Directeur
Co-directeur

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu ma directrice de thèse, Sabine Caré, du temps conséquent qu'elle a su m'accorder, de ses qualités pédagogiques, ses conseils, ses valeurs humaines, ses encouragements, et sa confiance.

J'aimerais aussi remercier mon co-directeur, le professeur Robert Leroy, pour son enthousiasme, ses conseils, ses nombreuses idées qui ont permis d'enrichir ce travail, et avec qui j'ai pris un grand plaisir à travailler.

Je tiens aussi à remercier profondément Joseph Gril, Jean Luc Coureau, Emmanuel Ferrier, Yves Berthaud et Sylvain Chataigner de m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury de cette thèse.

Je remercie également chacun des membres de l'équipe qui ont accepté de donner de leur temps et ont contribué à l'avancée de cette thèse : Sylvain Chataigner, Michel Bornert, Nedjar Boumediene, François Bertrand, Daniel Cintra, Cédric Mézière, David Hautemayou, Géraldine Vue, et André Fléty.

J'ai une pensée profonde pour ces collègues avec qui ces années de thèse ont été appréciables, Jalila, Xavier, Hamid, Jiyun, Ron Wei...

Et ma dernière pensée est pour ma petite famille, mon cher époux qui m'a supportée et soutenue, mon petit garçon qui est une lumière pour moi, mes parents qui m'ont encouragée assidûment, ma sœur, Lydia, sans raison, juste comme ça.

Résumé

La mixité bois-béton est une solution intéressante dans le domaine des ouvrages d'art pour la réalisation de ponts, et dans le domaine du bâtiment dans la confection de planchers mixtes bois-béton.

Le laboratoire Navier travaille depuis plusieurs années au développement du procédé par collage appliqué aux structures mixtes bois-béton. Contrairement aux techniques d'assemblage usuelles (connecteurs métalliques), cette technique d'assemblage permet d'assurer une connexion quasi parfaite entre le bois et le béton. Des travaux antérieurs ont montré la bonne performance de structures mixtes collées bois-béton du point de vue de leur tenue mécanique en fatigue.

Cependant la connexion par collage nécessite une étude complémentaire concernant la durabilité de l'assemblage collé bois-béton, en particulier lorsque la structure mixte est soumise à des conditions hygrométriques variables.

Les travaux menés pendant la thèse ont pour objectifs de déterminer les facteurs qui influent sur la tenue de ces assemblages collés sous chargement hydrique ; ils se divisent en trois parties :

- Deux parties expérimentales :

- (1) Des tests de cisaillement « Push-Out », en collaboration avec le Laboratoire Départemental d'Autun, ont permis d'évaluer l'effet des propriétés élastiques de l'adhésif sur la tenue de l'assemblage en cisaillement. L'objet de cette étude expérimentale est de valider un choix de colle pour ce type d'assemblage, prenant en compte un vieillissement hydrique, en se basant sur la capacité maximale atteinte en cisaillement et le mode de rupture de l'assemblage.
- (2) Parallèlement aux tests de cisaillement, l'effet de chargements hydriques sur la tenue d'assemblages collés bois-béton a été étudié. L'analyse du comportement hydrique de la structure a été réalisée par la technique de corrélation d'image (DIC) sur des assemblages bois-béton collés de petite taille. Ces mesures de déformations locales ont permis de localiser des zones d'endommagement liées notamment aux déformations hydriques du bois empêchées par l'interface collée. Les effets des propriétés élastiques de l'adhésif, de la géométrie du bois (notamment sa structure et le sens des cernes par rapport au plan de collage) ainsi que du comportement mécanique du matériau cimentaire ont été étudiés.

- Une partie numérique :

- (3) Un modèle numérique par éléments finis a été validé en comparant les résultats numériques aux cartes de déformations obtenues expérimentalement. L'analyse numérique a permis de quantifier les contraintes induites au niveau de l'interface en relation avec les déformations hydriques empêchées par l'interface collée, et de prévoir le comportement à l'échelle 1 de structures mixtes.

Ces différentes investigations ont permis de proposer des solutions optimisant ce type de connexion et de définir des conditions de mise en œuvre et d'utilisation de ces assemblages.

Summary

The wood-concrete composite is an interesting solution in the field of Civil Engineering to create high performance bending elements for bridges, as well as in the building construction for the design of wood-concrete floor systems.

The Navier Laboratory has been working for many years on the development of the bonding process as applied to wood-concrete composite structures. Contrary to conventional joining connectors (metal connectors), this assembling technique does ensure an almost perfect connection between wood and concrete. Previous work has already shown good performances of glued wood-concrete composite structures in terms of mechanical fatigue.

However, the bonding connection requires additional research on the long-term behaviour of glued wood-concrete composites, especially when this structure is subjected to variable hygrometric conditions.

The work undertaken during this thesis aims at determining the factors which induce damages on these glued wood-concrete assemblies under hygrometric loading; the research is divided into three parts:

- Two experimental parts:
 - (1) "Push-Out" shear tests conducted in collaboration with the Departmental Laboratory of Autun, were used to assess the effect of the elastic properties of the resin on the shear strength of the assembly. This experimental study aims at validating the adhesive of choice for this kind of connection, taking into account ageing under variable hygrometric conditions. Analysis is based on maximum shear capacity and on the failure mode of the assembly.
 - (2) In addition to shear tests, the effect of hygrometric loading on the durability of glued wood-concrete assemblies was examined. The analysis of the hydric behaviour of the structure was carried out by the digital image correlation (DIC) technique on small-sized glued wood-concrete assemblies. The measurements of the local deformations allowed us to locate areas of damage, particularly due to the hydric deformations of the wood prevented by the glued connection. The effects of the elastic properties of the resin, the microstructure of the wood (including its structure and the direction of the annual rings) as well as the mechanical behaviour of the concrete material were examined.
- A numerical part:
 - (3) A numerical finite element model was validated by comparing the numerical results to the deformation maps experimentally obtained. Numerical analysis was used to quantify the stresses induced to the structure, in relation to hydric deformations prevented by the glued connection. Moreover investigations at the full scale were conducted to evaluate the long-term behaviour under variable hygrometric conditions.

These investigations were conducted in order to offer solutions aiming at optimizing this type of connection, and to define conditions for the use of these glued assemblies.

Table des matières

RESUME	3
SUMMARY	4
INTRODUCTION GENERALE.....	9
1 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	11
1.1 Motivations	12
1.1.1 Les assemblages bois-béton	14
1.1.1.1 Exemples de structures mixtes bois-béton	14
1.1.1.2 Les systèmes de connexion	15
1.1.2 Étude de la durabilité d'assemblages bois-béton	17
1.2 Propriétés et vieillissement des matériaux.....	17
1.2.1 Le bois	17
1.2.1.1 Structure du bois	17
1.2.1.2 Hygroscopie du bois et propriétés de transfert	19
a) Taux d'humidité du bois et point de saturation des fibres (PFS)	19
b) Hystérésis de sorption.....	20
c) La diffusion hydrique	22
1.2.1.3 Variations dimensionnelles du bois : retrait et gonflement	23
1.2.1.4 Comportement mécanique du bois	25
a) Modules d'élasticité.....	25
b) Résistances	26
c) Comportements mécaniques et taux d'humidité.....	28
d) Les effets différés et les couplages hydromécaniques	29
1.2.2 Le béton	30
1.2.2.1 Généralités sur le béton	30
1.2.2.2 Comportement mécanique des bétons	31
a) Résistances et modules	31
b) Comportement mécanique des bétons	32
1.2.2.3 Phénomènes de retrait	33
1.2.2.4 Propriété de fluage des bétons	34
1.2.3 Les colles	35
1.2.3.1 Mécanismes d'adhésion	36
1.2.3.2 Les colles structurales	37
1.2.3.3 Propriétés de vieillissement d'une résine structurale	39
a) Effets de la température	39
b) Effets de l'humidité	40
c) Effets de sollicitations mécaniques	41
1.3 Le collage en génie civil.....	42
1.3.1 Étude du comportement mécanique d'un assemblage collé.....	42
1.3.1.1 Essais mécaniques	42

a)	Essais de cisaillement par torsion	43
b)	L'essai "Thick Adherend Shear Test" (TAST).....	43
c)	L'essai ARCAN.....	44
d)	Essais de cisaillement simple et double recouvrement	44
1.3.2	Études de la durabilité d'assemblages collés	47
1.3.2.1	Vieillissement d'assemblages collés : étude des propriétés d'adhérence	47
1.3.2.2	Vieillissement d'assemblages bois-béton usuels.....	48
1.3.3	Conclusion	49
1.4	Conclusion, stratégie de la recherche	49
2	MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES	53
2.1	Propriétés des matériaux	54
2.1.1	Les bois.....	54
2.1.1.1	Propriétés mécaniques du bois	55
a)	Propriétés mécaniques du lamellé-collé	55
b)	Modules d'élasticité de l'épicéa et du douglas (bois massif).....	55
2.1.1.2	Hygroscopie du bois.....	56
a)	Courbes de sorption	56
b)	Coefficients de diffusion	59
2.1.1.3	Retrait et gonflement du bois	65
2.1.2	Les colles	66
2.1.2.1	Caractéristiques des résines.....	66
2.1.2.2	Vieillissement des résines	67
2.1.3	Les bétons	69
2.2	Méthodes expérimentales	69
2.2.1	Essais mécaniques : essais Push-Out	70
2.2.2	Tests de chargement hydrique.....	71
2.2.2.1	Les corps d'épreuves	71
2.2.2.2	L'essai d'imbibition	72
2.2.2.3	Tests de chargement hydrique sous humidité relative élevée.....	74
2.3	Exploitation des essais : analyse par corrélation d'images 2D	76
2.3.1	Principe de la technique de corrélation d'images 2D.....	76
2.3.1.1	Mesure du champ de déplacement	76
2.3.1.2	Calcul du champ de déformation.....	78
2.3.1.3	Évaluation des incertitudes de mesures	80
a)	Origine des incertitudes.....	80
b)	Minimiser les erreurs, mise en place de l'essai	81
c)	Évaluer les erreurs	81
2.3.2	Analyse de champs de déformation sur les essais Push-Out.....	85
2.3.3	Utilisation de la technique pour les essais de chargement hydrique	86
2.3.3.1	Observation de la surface entière de l'éprouvette (champ macroscopique)	86
2.3.3.2	Observation de l'interface avec un champ de 1 cm.....	87
2.3.4	Récapitulatif des essais de corrélation d'images numériques	87
3	ESSAIS PUSH-OUT SUR ASSEMBLAGES COLLES BOIS-BETON.....	89
3.1	Mise au point de l'essai Push-Out	90

3.1.1	Dimensionnement des éprouvettes, étude théorique	90
3.1.1.1	Longueur d'ancrage.....	90
3.1.1.2	Répartition des contraintes le long du joint de colle	91
3.1.1.3	Application à une structure réelle (poutre mixte bois-béton collée).....	92
3.1.2	Protocole expérimental et exploitation de l'essai.....	93
3.1.3	Résultats de la série préliminaire (série 0, colle époxy).....	94
3.1.3.1	Protocole de fabrication des éprouvettes.....	94
3.1.3.2	Résultats expérimentaux	95
3.2	Choix de la colle (série 1, trois types de colles)	98
3.2.1	Réalisation des assemblages collés	98
3.2.2	Résultats expérimentaux	100
3.2.2.1	Essais avant vieillissement	100
3.2.2.2	Essais après vieillissement	103
a)	Suivis des échantillons au cours du vieillissement	103
b)	Résultats expérimentaux.....	104
c)	Compléments d'étude par analyse d'images numériques	106
3.3	Conclusion.....	110
4	TENUE DES ASSEMBLAGES BOIS-BETON SOUS CHARGEMENT HYDRIQUE	113
4.1	Déformations libres d'un échantillon de bois, validation de l'essai	114
4.1.1	Validation de la technique DIC pour les tests d'imbibition	114
4.1.1.1	Mise au point de l'essai.....	115
4.1.1.2	Évaluation des effets de bords.....	116
a)	Validation mesures DIC / mesures palmer	116
b)	Corrélation champ de déformation / hauteur de remontée d'eau.....	117
4.1.1.3	Déformations libres du bois soumis à un test d'imbibition	120
4.1.2	Validation de la technique DIC pour les tests de chargement sous HR	124
4.1.2.1	Mise au point de l'essai.....	124
4.1.2.2	Déformations libres du bois soumis à HR=97 %	126
4.2	Comportement hydromécanique de l'assemblage bois-béton	130
4.2.1	Série 1 : Tests sous imbibition - échantillons épicea-mortier	130
4.2.1.1	Orientation convexe des cernes - colle époxy	130
4.2.1.2	Orientation concave des cernes - colle époxy	131
4.2.1.3	Colle polyuréthane - colle acrylique modifiée	132
4.2.1.4	Conclusion	134
4.2.2	Série 2 : Assemblages avec mortier - tests sous HR=97 %	135
4.2.2.1	Cas épicea-mortier sens convexe	135
4.2.2.2	Cas épicea-mortier sens concave.....	138
4.2.2.3	Conclusion	139
4.2.3	Série 3 : assemblages avec BFUP - tests sous HR=97 %	140
4.2.3.1	Épicea-BFUP - Orientation convexe des cernes.....	140
4.2.3.2	Épicea-BFUP - sens concave des cernes.....	147
4.2.3.3	Douglas-BFUP	152
4.2.3.4	Conclusion	157
4.2.4	Série 4 : Essais complémentaires	157
4.2.4.1	Épicea sens convexe avec rainures-BFUP	158

4.2.4.2	Douglas toutes lamelles-BFUP	159
4.3	Conclusion.....	162

5 MODELISATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE DE

L'ASSEMBLAGE BOIS-BETON..... 165

5.1	Modélisation hydromécanique	166
5.1.1	Diffusion hygroscopique dans le bois	166
5.1.2	Comportement mécanique	168
5.2	Hypothèses du calcul numérique	170
5.2.1	Géométries et maillage	170
5.2.2	Propriétés des matériaux	171
5.2.2.1	Valeurs numériques pour les bois d'épicéa et de douglas	171
5.2.2.2	Valeurs numériques pour le béton et l'adhésif époxy	173
5.3	Validation du modèle	173
5.3.1	Corps d'épreuve en bois en cours d'humidification.....	174
5.3.1.1	Cas de l'épicéa	174
5.3.1.2	Cas du douglas	177
5.3.1.3	Conclusion	180
5.3.2	Assemblages bois-béton en cours d'humidification.....	180
5.3.2.1	Champ de déformation	181
5.3.2.2	Estimation des contraintes induites au niveau de l'interface.....	184
a)	Cas de la fissuration du béton.....	184
b)	Cas du décollement de l'interface.....	186
c)	Conclusion.....	189
5.3.3	Synthèse.....	190
5.4	Changement d'échelle : application à un ouvrage réel	191
5.4.1	Caractéristiques géométriques de la section étudiée	192
5.4.2	Calcul du champ de teneur en eau	192
5.4.3	Orientation convexe des cernes.....	193
5.4.4	Orientation concave des cernes.....	199
5.4.5	Synthèse.....	205
5.5	Conclusion.....	206

CONCLUSION GENERALE..... 209

BIBLIOGRAPHIE 215

ANNEXES..... 222

A1.	Imagerie par Résonance Magnétique.....	223
A2.	Gammadensimétrie.....	225
A3.	Cartes de déformations pour les assemblages bois-béton sous sollicitation hydrique	228
A4.	Application numérique : étude paramétrique.....	235

Introduction générale

Dans le domaine du génie civil, la technique de collage est essentiellement utilisée pour la réparation et le renforcement d'ouvrages en béton. En collant par exemple des renforts en acier ou en matériaux composites sur les structures, leur durée de vie est prolongée et ceci à moindre coût. Par ailleurs, le collage est aussi pensé aujourd'hui pour la réalisation de structures neuves, où il intervient entre autres pour la réalisation de structures multi-matériaux, comme les composites ou encore le bois et le béton.

Aussi, pour contribuer au développement de cette technologie, le laboratoire Navier travaille depuis plusieurs années à l'optimisation de structures mixtes bois-béton. Il participe aussi à la valorisation du bois dans les ouvrages d'art pour répondre à la problématique de développement durable. Ce type de structures, usuellement assemblées par des connecteurs métalliques, a pour principe d'utiliser chacun des matériaux dans leur domaine de prédilection. Ainsi, le béton travaille en compression et le bois reprend les efforts de traction. Des études expérimentales et théoriques réalisées à Navier ont montré la bonne performance mécanique des systèmes d'assemblages par collage appliqués aux structures mixtes bois-béton. La structure qui comporte une dalle en béton fibré ultra-performant et une poutre en bois, assemblés exclusivement par un adhésif époxy, présente une raideur plus importante qu'avec des connecteurs traditionnels et a été validée en fatigue sous conditions thermo-hydriques constantes.

Pour pouvoir valider le système de connexion par collage appliqué aux structures mixtes bois-béton, il est essentiel d'assurer leur tenue à long terme lorsque celles-ci sont soumises aux conditions climatiques extérieures. Il s'agit alors de faire une étude complémentaire relative à l'influence des variations climatiques sur la tenue d'un assemblage collé bois-béton. En effet, des variations hydriques peuvent altérer les propriétés d'adhérence de la colle mais aussi induire des dommages dans le bois, dans le béton, et au niveau de l'interface notamment en raison des propriétés différentes entre ces deux matériaux.

Précisément, la thèse porte sur l'étude de la durabilité d'un assemblage bois-béton soumis à des chargements hydriques (humidification).

L'objet de ce travail est donc d'identifier les paramètres qui gouvernent les mécanismes d'endommagement et de proposer des solutions technologiques et des conditions de mise en œuvre optimisant la tenue de l'assemblage.

Ce mémoire de thèse est constitué de cinq chapitres qui seront précédés d'une introduction visant à définir le travail réalisé plus précisément :

- Le premier chapitre (synthèse bibliographique) est consacré à une étude bibliographique dans laquelle on présente l'utilisation du bois et de la mixité bois-béton dans le domaine de la construction. Le chapitre détaille ensuite les comportements mécaniques et les propriétés de vieillissement des trois matériaux constituant l'assemblage pour aider à la compréhension du

comportement à long terme de celui-ci. Nous proposerons ensuite une synthèse portant sur le comportement mécanique et la durabilité d'assemblages collés dans le génie civil est présentée. Enfin, nous avons conclu en précisant les travaux à mener dans une dernière partie, les enjeux, les objectifs de la thèse et les moyens mis en œuvre pour répondre aux questions posées.

- Le deuxième chapitre (Matériaux et méthodes expérimentales) fait l'inventaire des propriétés hydromécaniques des matériaux bois, béton et colle afin d'aider à la compréhension du comportement sous sollicitations hydriques de l'assemblage. Deux espèces de bois, deux types de béton et cinq adhésifs sont considérés. Les essais mis en place pour analyser les effets mécaniques induits au niveau de la connexion par collage lors d'une humidification sont ensuite présentés. Enfin, ce chapitre décrit la technique expérimentale utilisée pour l'exploitation des résultats, à savoir la corrélation d'images numériques.
- Le troisième chapitre (Essais Push-Out sur assemblages collés bois-béton) porte sur l'évaluation des propriétés d'adhérence de la colle sur les substrats bois et béton. Elle se fera par des essais de cisaillement (Push-Out) sur des assemblages collés bois-béton qui permettront de valider le choix de la résine. On tentera d'évaluer l'effet de l'humidité sur ces propriétés d'adhérence.
- Il s'agira dans le chapitre 4 (Tenue des assemblages bois-béton sous chargement hydrique) de nous pencher sur l'étude du comportement de l'assemblage collé sous chargement hydrique variable. Nous nous intéresserons ici à la mise au point des essais et aux résultats expérimentaux qui permettront notamment d'identifier précisément les mécanismes d'endommagement en lien avec les matériaux d'étude (adhésif, béton) et la structure du bois.
- Enfin, le dernier chapitre (Modélisation hydromécanique de l'assemblage bois-béton) présente le développement et la validation d'un modèle numérique par éléments finis pour optimiser ce type de connexion et définir des conditions de mise en œuvre et d'utilisation de ces assemblages. Une simulation d'une structure à l'échelle 1 sera réalisée afin de vérifier sa tenue sous humidité.
- Ce mémoire se terminera par une conclusion générale dans laquelle des perspectives seront proposées.

1 Synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique qui fait l'objet de ce chapitre s'organise en 3 parties :

La première partie introduit l'utilisation du matériau bois et de la mixité bois-béton dans le domaine de la construction afin de resituer le contexte de l'étude (motivations).

La deuxième partie détaille les comportements mécaniques et les propriétés, notamment de vieillissement, des trois matériaux constituant l'assemblage collé bois béton.

Enfin dans la troisième partie, on présente un résumé d'étude portant sur le comportement mécanique et la durabilité d'assemblages collés dans le génie civil.

Cette revue bibliographique a permis ensuite de définir, dans une dernière partie, le contour des travaux à mener en précisant d'une part les enjeux et les objectifs de la thèse, et d'autre part les moyens mis en œuvre pour répondre aux questions posées.

1.1 Motivations

L'utilisation du bois dans le domaine du génie civil est une alternative intéressante dans le sens où elle s'inscrit dans une démarche de développement durable. Ce matériau, puits de carbone, consomme peu d'énergie pour sa production et sa transformation et contribue ainsi à diminuer les émissions de dioxyde de carbone. La question de l'environnement est aujourd'hui incontournable et les atouts que le matériau bois présente permettent de satisfaire aux besoins environnementaux et énergétiques de la société.

Le bois est utilisé dans le domaine de la construction, en tant que matériau de structure, en particulier dans les ouvrages d'art. Lorsqu'il est utilisé en tant que structure porteuse, on le retrouve sous forme de bois massif ou de produit reconstitué, notamment le lamellé-collé. Il s'agit d'un procédé de fabrication consistant à coller entre elles des lamelles de bois d'épaisseur limitée à 45 mm, l'intérêt étant d'obtenir une pièce de grande dimension ou de forme particulière (par exemple arrondie) qui autorise des structures de plus grande portée et plus performantes ou innovantes.

Aujourd'hui, le bois connaît une ère nouvelle en France. Passerelles piétonnes, et ponts routiers en bois ont vu le jour récemment. Le pont sur la Dore, construit en 1994 à St-Gervais-sous-Meymont, est un pont routier, de 33 m de longueur et de 6 m de largeur. Sa structure porteuse est composée d'éléments de bois lamellé-collé. Le pont de Merle a vu le jour en 1999. Il s'agit d'un ouvrage de 57 m de portée dont la structure est en bois lamellé-collé de douglas. On peut citer aussi les passerelles de Doubs à Oye et Pallet (1993) et d'Ajoux (2000), bâties en bois massif, ainsi que la passerelle de Vaires (2004), en Seine-et-Marne (Figures 1-1 et 1-2)

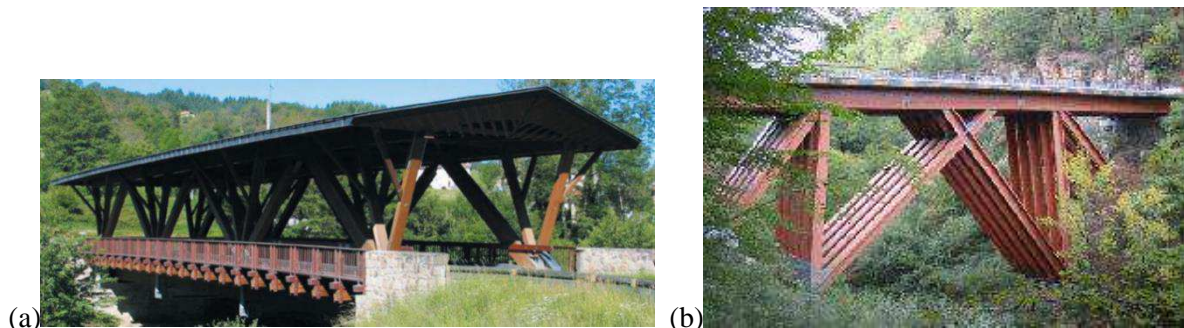


Figure 1-1: (a) Photos Pont sur la Dore, (b) Pont de Merle (<http://www.cete-est.developpement-durable.gouv.fr>).

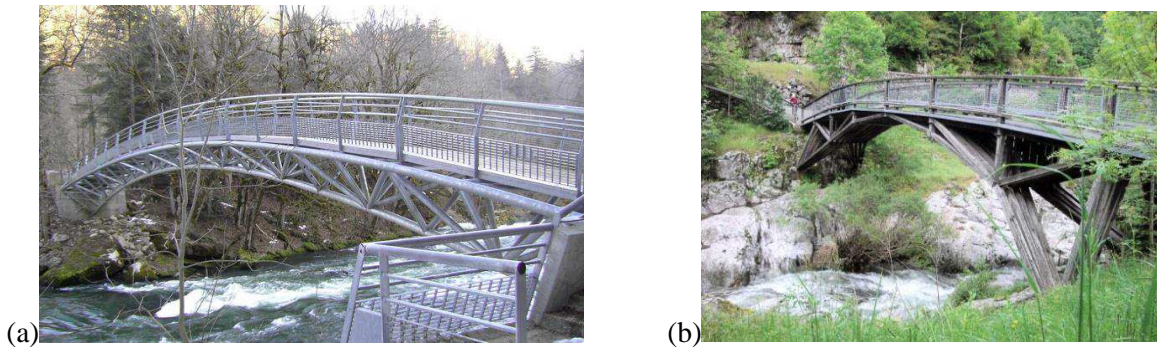


Figure 1-2 : (a) Passerelles de Doubs (<http://www.saut-du-doubs.biz>), (b) Passerelle d'Ajoux (<http://www.ardeche.fr>).

L'utilisation du bois s'étend aussi dans le domaine du bâtiment. Ses applications sont nombreuses : structures porteuses (dont charpentes), éléments de façade (panneaux, bardages), menuiseries extérieures, menuiseries et aménagements intérieurs, revêtements de sol et mur (parquets, lambris) etc.

Aujourd'hui, le matériau bois est un thème de recherche en pleine expansion, et se voit à la base d'innovations séduisantes. Ainsi, en plus de son utilisation traditionnelle en matériau seul dans les ouvrages d'art ou dans le bâtiment, le bois est aussi assemblé à d'autres matériaux de construction aux propriétés différentes tels que l'acier ou le béton. La combinaison « multi-matériaux » est alors optimisée de façon à tirer au mieux profit des propriétés mécaniques et thermiques spécifiques de chaque matériau. On peut citer pour exemple la passerelle de La Rochelle en Ardenne d'une longueur de 32 m, construite en 2006, qui assemble le bois et l'acier de façon à ce que le bois travaille en compression et l'acier en traction (Figure 1-3).



Figure 1-3 : Passerelle mixte bois-acier de La Rochelle en Ardenne (<http://www.houtinfo Bois.be>).

La mixité bois-béton s'est aussi imposée comme étant une solution intéressante dans le domaine des ouvrages d'art pour la réalisation de ponts, mais aussi dans le domaine du bâtiment dans la réalisation de

planchers mixtes bois-béton. Cet aspect est développé plus particulièrement au paragraphe suivant (§ 1.1.1).

1.1.1 Les assemblages bois-béton

1.1.1.1 Exemples de structures mixtes bois-béton

L'association des deux matériaux bois et béton a pour principe d'utiliser chacun de ces matériaux dans leur domaine de prédilection. Dans le domaine des ouvrages d'art, le principe des ponts mixtes bois-béton est le même que pour les ponts mixtes acier-béton. La dalle béton participe à la reprise des efforts en compression et la poutre en bois reprend les efforts en traction. On peut citer le Pont des Fayettees en France (Isère, Figure 1-4) dont les poutres secondaires sont en bois-béton, ou le Pont de la Resgia en Suisse (Figure 1-5). Le béton constitue la semelle qu'on lie mécaniquement par des connecteurs métalliques à des poutres en bois. Ainsi, on utilise au mieux les propriétés mécaniques de chacun des matériaux.

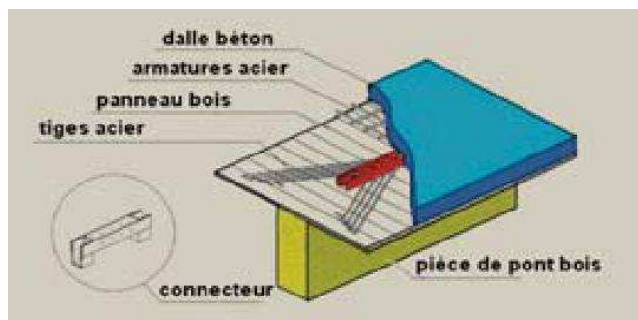


Figure 1-4 : Pont "des Fayettees" dont la mixité du tablier est assurée par le système de connexion Bertsche (Flach M., 2000).



Figure 1-5 : Pont la "Resgia" en Suisse (<http://fr.structurae.de>).

Dans le domaine du bâtiment, un plancher mixte est composé d'une structure porteuse en bois (les poutres), d'une dalle béton et de systèmes de connexion. On l'utilise aussi bien dans la réhabilitation, du fait de la possibilité d'augmenter la rigidité et la résistance des planchers bois, que dans la construction

neuve qui permet de réduire la charge du bâtiment, et les ponts thermiques (on coule une dalle de béton de 8 à 10 cm de hauteur sur des connecteurs qui rigidifient la structure) (Figure 1-6).

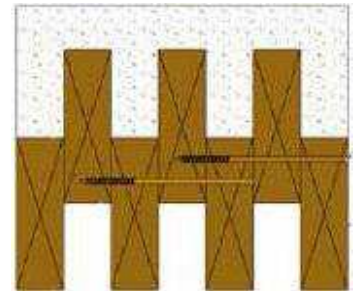


Figure 1-6 : Dalle mixte bois-béton développée par le groupe CBS-CBT (D-Dalle). Portée de la poutre : 11 m à 18 m (<http://www.cbs-cbt.com>).

1.1.1.2 Les systèmes de connexion

Il existe aujourd'hui deux familles de connexion (Schäfers & Seim, 2010 ; Gutkowski, Brown, Shigidi, & Natterer, 2004 ; Jutila & Salokangas, 2010).

(1) La connexion dite par « compression locale du bois »

Ce sont des connecteurs locaux posés de façon discontinue. On augmente la résistance en cisaillement entre le bois et le béton par compression des connecteurs sur le bois. On peut citer :

- les connexions par entailles (faites dans le bois), que l'on remplit de béton lors du coulage. Pour éviter le glissement entre le bois et le béton, la surface de contact est crénelée, dentelée ou trouée. La présence de vis, ou de fers d'ancrage enfoncés dans le bois, renforce le contact (Figure 1-7). Ce principe est celui utilisé pour la D-Dalle (Figure 1-6) ;
- les connecteurs métalliques (pointes, vis, goujons, tubes). Le principe est le même que pour la connexion par entailles. Les éléments en acier sont utilisés pour former des dents et sont cloués, vissés ou collés dans le bois et noyés dans le béton.

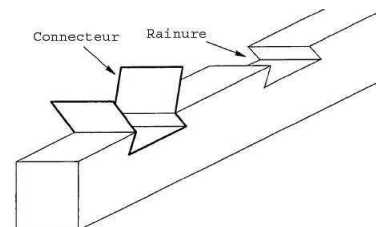
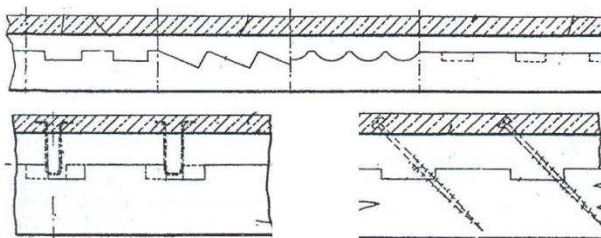


Figure 1-7 : Exemples de connecteurs par entailles : brevet d'invention de Schaub (Schaub, 1929) et Martino (Martino, 2005).

On augmente la résistance en cisaillement à l'interface en ajoutant des connecteurs. Mais la présence de connecteurs « locaux » sur la surface du bois peut entraîner la rupture de celui-ci.

(2) *La connexion dite « par adhérence des surfaces »*

Dans ce cas, la répartition de la connexion est uniforme. L'adhérence entre le bois et le béton peut être assurée par un filet ou une grille de métal fixés sur le bois.

Une synthèse des systèmes de connexion existants est présentée dans la thèse de Pham (Pham, 2007).

En plus de ces connexions effectuées par des moyens mécaniques, il est possible aussi d'assembler le bois et le béton par collage (Pincus, 1970 ; Maurice & Christophe, 2000 ; Pham, 2007). Dans ce cas, les résultats montrent un comportement sans glissement de l'association bois-béton. Il a été montré que la rigidité d'ensemble de la structure est augmentée par rapport aux connecteurs métalliques. Le collage est par ailleurs aussi une solution retenue dans la construction d'ouvrages d'art mixte, notamment dans l'assemblage de l'acier et du béton. On peut citer plusieurs exemples et projets en cours :

- Le projet national de recherche MIKTI entre 2001 et 2005 (www.pnmikti.org), qui s'inscrivait autour de la construction de ponts et de passerelles mixtes acier-béton allant de 35 m à 80 m de longueur. Il s'agissait entre autres de réfléchir sur la mise au point ou l'amélioration de techniques nouvelles de réalisation (préfabrication), mais aussi d'étudier de nouveaux modes d'assemblage des deux matériaux, dont l'utilisation de colle constitue l'élément de jonction.
- La passerelle de Gärtnerplatz à Kassel qui a été réalisée avec du Béton Ultra Haute Performance (BUHP). Cette construction érigée en 2007 mesure 133 m de long. Elle se compose d'une structure métallique en treillis reliée aux poutrelles de BUHP au moyen d'éléments en acier. Dans ce cas, ce sont les dalles de revêtement, aussi composées de BUHP, qui sont collées aux poutrelles grâce à une résine époxy (Figure 1-8a).

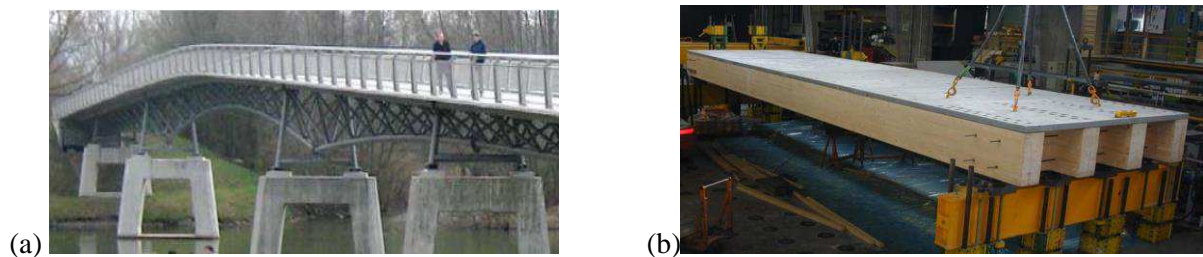


Figure 1-8 : (a) Passerelle mixte acier-béton de Kassel (Spasojevic, Burdet, & Muttoni, 2008), (b) prototype de dalle de pont Bois/BUHP/Carbone-époxy (Pham, 2007).

La solution de collage bois-béton a été développée au laboratoire Navier dans le cas de l'assemblage bois-béton (Pham, 2007). Les essais réalisés ont montré la bonne performance de ces assemblages du point de vue de la tenue mécanique en fatigue (Figure 1-8b, projet européen NR2C).

1.1.2 Étude de la durabilité d'assemblages bois-béton

La tenue mécanique d'assemblages bois-béton est fortement étudiée, et comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, de nombreux systèmes de connexion ont été développés pour améliorer le comportement mécanique d'une structure bois-béton selon l'utilisation et les besoins.

Concernant la durabilité¹ et notamment les effets différés des matériaux constitutifs, dont les connecteurs, sur la tenue à long terme de la structure, la littérature est très peu abondante, bien que l'on trouve quelques travaux traitant de ce sujet (Ceccotti, Massimo, & Giordano, 2006 ; Bou Said, 2003 ; Fragiocome, Amadio, & Macorini, 2007). L'objet de ce travail est d'analyser plus précisément les effets de conditions hygrométriques variables sur la tenue à long terme de la connexion par collage. L'étude bibliographique qui suit a pour objectif d'une part de présenter les propriétés des matériaux constitutifs de l'assemblage collé (bois, colle, béton) notamment sous conditions hygrométriques variables, et d'autre part de proposer un état de l'art sur le collage structural.

1.2 Propriétés et vieillissement des matériaux

1.2.1 Le bois

Le bois est un matériau d'origine biologique. Ceci implique que ses caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et biologiques varient d'une espèce à l'autre, mais aussi au sein d'une même espèce, voire d'un même arbre.

C'est un matériau cellulaire, anisotrope, poreux, présentant plusieurs niveaux de structure que nous présentons brièvement dans le paragraphe suivant.

1.2.1.1 Structure du bois

Le bois possède une structure cellulaire principalement orientée selon la direction de l'axe de l'arbre. À l'échelle macroscopique, on distingue sur un tronc d'arbre trois sections orthogonales (Figure 1-9) :

- transversale : plan perpendiculaire à l'axe de symétrie dans lequel on voit les cernes ;
- longitudinale radiale : plan orienté perpendiculairement aux cernes et parallèle au fil du bois ;
- longitudinale tangentielle : plan orienté tangentiellement aux cernes et parallèle au fil du bois.

¹ La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).

Ici nous ne considérons pas la problématique de la durabilité naturelle du bois qui est sa capacité à résister aux agents biologiques de destruction (insectes et champignons).

On notera que l'on distingue deux grandes classes d'arbre : les résineux (ou conifères) et les feuillus. Ces deux familles de bois présentent des plans ligneux² différents. La description faite de la structure du bois dans ce paragraphe est celle des résineux, qui sont les bois utilisés dans les travaux présentés ici (l'épicéa et le douglas). Dans le cas des résineux, le bois est constitué de trachéides qui sont des cellules longitudinales qui remplissent les fonctions de conduction de la sève et de soutien. Précisément, les trachéides longitudinales constituent 90 % de l'ensemble des cellules d'un résineux. Ce sont des cellules allongées mesurant 2 à 9 mm de longueur, connectées les unes aux autres et couramment appelées veines ou fibres du bois. Le bois est aussi composé de cellules radiales, les parenchymes qui constituent les rayons ligneux pour assurer le stockage des substances nutritives (Figure 1-9).

On peut identifier la composition chimique des cellules du bois. Elles sont composées de cellulose et d'hémicellulose en majorité (environ 70 %), de lignine (20 %), et en plus petite quantité de matière pectine et de cendre.

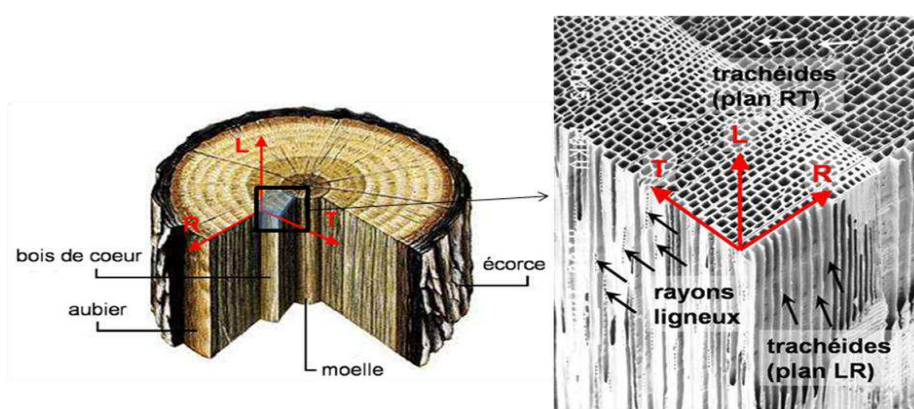


Figure 1-9 : Représentation schématique d'un bois, avec les 3 sections orthogonales et structure anatomique d'un résineux (mecaweb.free.fr).

À une échelle encore plus fine, celle de l'ultrastructure du bois, on peut détecter les différentes couches qui forment la paroi cellulaire (Figure 1-10). Précisément, la teneur en lignine est plus importante dans la paroi cellulaire extérieure (la matrice interpariétale) puis diminue vers l'intérieur de la cellule, tandis que la teneur en cellulose augmente.

² Le plan ligneux d'une espèce est défini par les caractéristiques morphologiques des cellules et la façon dont elles sont disposées les unes par rapport aux autres. Il est caractérisé par ses trois directions de croissance naturelle.

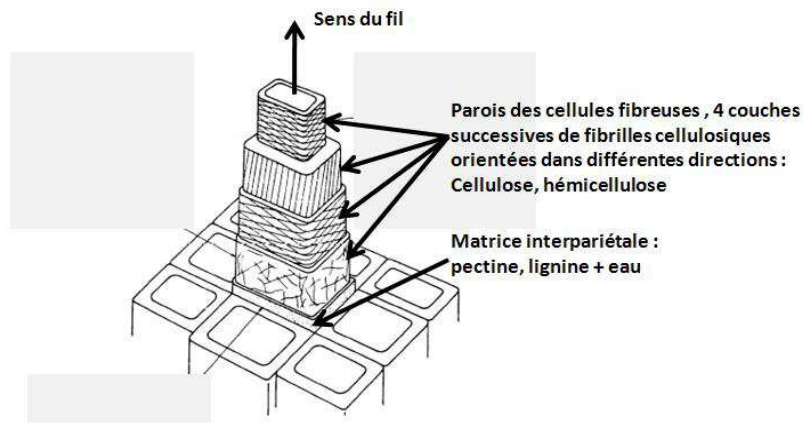


Figure 1-10 : Schématisation d'une paroi cellulaire cellulaire longitudinale (trachéide) (Almeida, 2006).

La connaissance de la microstructure du bois est importante car elle permet d'introduire le caractère hygroscopique du bois lié à l'hygrophilie de ses principaux constituants : la cellulose et la lignine qui adsorbent les molécules d'eau via un mécanisme de liaison appelé « pont hydrogène ».

En résumé, le bois est un matériau hétérogène essentiellement constitué d'air, d'eau et de composants polymériques, notamment la cellulose et la lignine.

Cependant il est possible, à l'échelle macroscopique de quelques centimètres, de considérer le bois comme un matériau homogène orthotrope défini par trois directions privilégiées : les directions radiales, tangentielles et longitudinales. Ainsi, les caractéristiques hygroscopiques et mécaniques du bois dépendent de la direction observée.

1.2.1.2 Hygroscopie du bois et propriétés de transfert

a) Taux d'humidité du bois et point de saturation des fibres (PFS)

L'eau dans le bois se présente sous quatre formes : l'eau de constitution, l'eau liée, la vapeur d'eau et l'eau libre. L'eau de constitution est l'eau contenue dans la matière ligneuse par des liaisons chimiques. L'eau liée, d'imprégnation ou de saturation dans les membranes cellulaires est adsorbée par les groupes hydroxyles. L'eau à l'état gazeux, au même titre que l'eau libre, remplit les vides cellulaires.

On définit le taux d'humidité ou la teneur en eau dans le bois h par :

$$1-1 \quad h = \frac{\text{masse d'eau contenue dans le bois}}{\text{masse du bois anhydre}} * 100$$

Elle est exprimée en pourcentage par rapport au bois anhydre (bois sec). Le bois est dit anhydre lorsque celui-ci ne contient que l'eau de constitution. Pour cela, il est séché à 103°C jusqu'à masse constante. La masse d'eau contenue dans le bois est relative à l'eau liée, à la vapeur d'eau et à l'eau libre.

De par son caractère hygroscopique, le bois tend constamment vers un équilibre hygroscopique en relation avec l'humidité de l'air qui l'entoure, l'humidité relative.

Le « domaine hygroscopique » du bois s'étend de l'état anhydre du bois, avec une teneur en humidité h égale à 0 % correspondant à une humidité relative (HR) de l'air de 0 % au point de saturation des fibres. Le point de saturation des fibres (PFS) est atteint lorsque l'humidité de l'air (HR) est proche de 100 %. L'eau liée est alors intégralement présente dans le bois et la teneur en eau dans le bois est située entre 25 et 35 % selon l'espèce de bois considérée.

Au-delà de la saturation des fibres, si le bois est en contact avec de l'eau liquide (eau de ruissellement, eau de condensation) la teneur en eau augmente par remplissage des vides cellulaires. Elle peut être supérieure à 100 % (Figure 1-11).

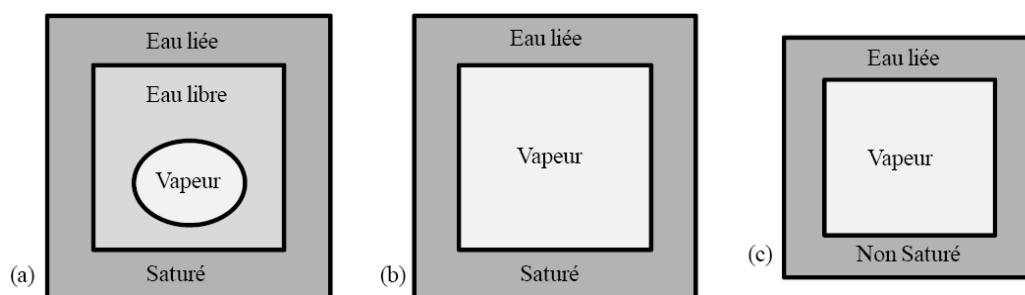


Figure 1-11 : Représentations schématiques de l'état de l'eau dans le bois, (a) au-dessus du PFS, (b) au PFS, (c) en dessous du PFS (Navi & Heger, 2005).

b) Hystérésis de sorption

À température constante, la courbe qui relie l'humidité relative de l'air à la teneur en humidité du bois est appelée « isotherme de sorption ».

De nombreux travaux ont montré qu'à température et à humidité relative données, les équilibres hygroscopiques atteints, selon que le bois perde ou prenne de l'eau, diffèrent légèrement les uns des autres. On distinguera donc l'isotherme d'adsorption qui désigne la fixation d'eau, l'augmentation de la teneur en humidité du bois, de l'isotherme de désorption, qui à l'inverse est définie par la perte d'eau du bois (Figure 1-12). Ces deux courbes forment une boucle d'hystérésis.

Sur la figure 1-12, on constate que les teneurs en eau dans le bois sont plus importantes pendant le cycle de désorption que pendant l'adsorption pour une humidité de l'air donnée. Cette figure montre l'irréversibilité du phénomène de sorption. De même, Peralta (Peralta, 1995) a montré que l'hystérésis de sorption est délimitée par les isothermes d'adsorption réalisée depuis l'état anhydre, et de désorption réalisée depuis l'état saturé. Les courbes intermédiaires de désorption se trouvent à l'intérieur de la boucle. D'une manière générale, ces courbes présentent une forme sigmoïdale et peuvent être représentées au moyen de plusieurs modèles existants dans la littérature. On peut citer parmi ces modèles, les modèles de BET, Dent, Hailwood Horobin, Van Den Ber etc. (Navi & Heger, 2005).

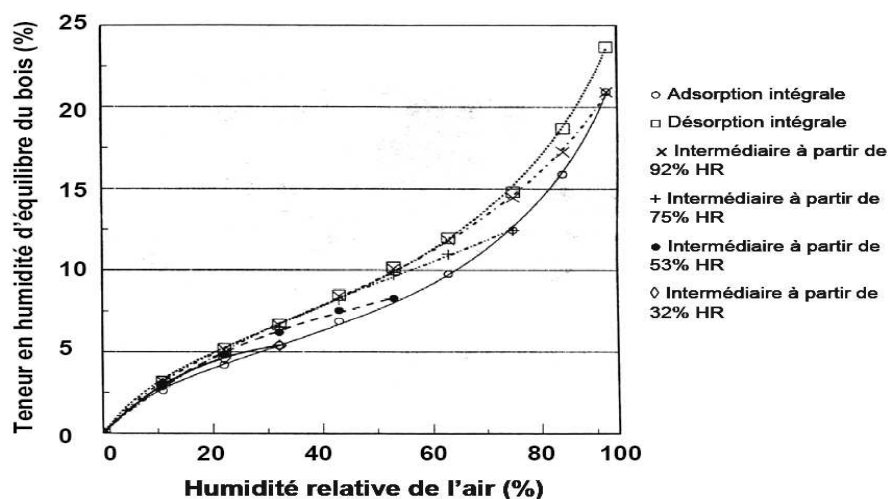


Figure 1-12 : Isotherme de sorption d'un bois de chêne rouge, obtenue pour l'adsorption et la désorption à $T=30^{\circ}\text{C}$ (Peralta, 1995).

Le paramètre essentiellement influant de l'isotherme de sorption est l'humidité relative (HR). Cependant d'autres facteurs peuvent affecter l'hystérèse de sorption, tels que la température, l'histoire du séchage du bois, ou l'application de contraintes sur le matériau. En effet, il a été montré dans un grand nombre de travaux, que l'augmentation de la température a pour effet de diminuer sensiblement la teneur en eau d'équilibre dans le bois pour une humidité relative donnée (Djolani, 1972). Aussi, l'application de contraintes de compression ou de traction va induire respectivement une diminution ou une augmentation de l'humidité dans le bois (Negi, 1999 ; Skaar, 1988). Pour exemple, les figures 1-13 et 1-14 montrent l'influence de la température extérieure et de l'application de contraintes mécaniques sur les isothermes de sorption. Pour le cas de l'application de contraintes mécaniques, les effets sont plus importants à humidités relatives élevées.

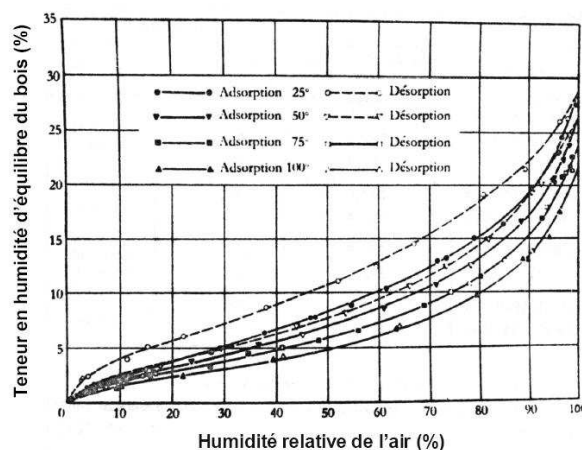


Figure 1-13 : Isothermes de sorption d'un bois de hêtre à quatre différentes températures (Almeida, 2006).

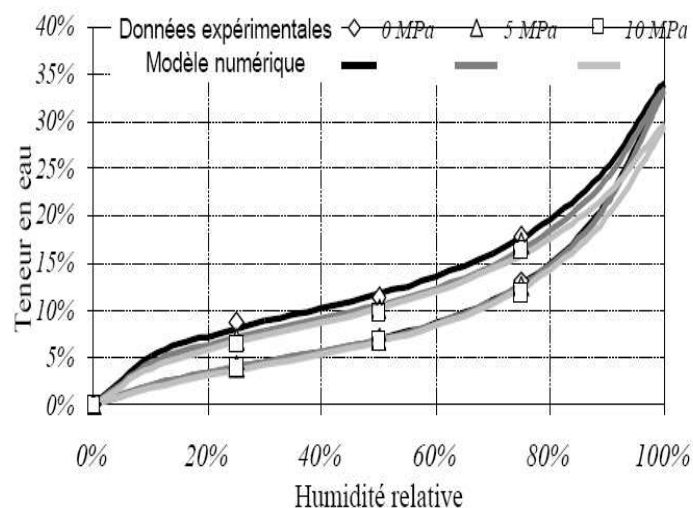


Figure 1-14 : Isothermes de sorption du douglas sous contraintes mécaniques homogènes (Merakeb, 2006).

Si l'on considère une structure mixte bois-béton collée, étant donné la continuité, mais surtout la rigidité de l'interface, le bois sera soumis en permanence à des contraintes de traction ou de compression. Ces contraintes induites par le retrait ou le gonflement du bois empêchés par l'interface vont dépendre des conditions climatiques. La connaissance des effets de la température et de l'application de contraintes mécaniques sur les propriétés hygroscopiques du bois est donc importante.

L'étude des propriétés de sorption est basée sur les états d'équilibre du matériau et ne prend pas en compte la cinétique d'humidification ou de séchage du bois. Or, si l'on souhaite étudier le comportement d'une structure en bois soumise aux conditions climatiques extérieures, la notion de temps entre en jeu dans les phénomènes hydriques, ce que nous présentons dans le paragraphe suivant, via les lois de diffusion.

c) La diffusion hydrique

On définit la diffusion hydrique comme étant le transport d'eau au sein du matériau sous l'effet d'un gradient d'une force motrice qui met en « mouvement » l'eau. Selon que l'on étudie la diffusion de l'eau libre, gazeuse ou liée, les processus de transport sont différents. Dans le domaine hygroscopique, seules coexistent la diffusion de l'eau liée et la diffusion de la vapeur d'eau, l'eau libre n'étant pas présente en dessous du PFS.

La diffusion dans les trois directions principales du bois est différente du fait du caractère anisotrope du bois.

D'une manière générale, le processus de diffusion de l'eau vapeur ou liée dans les pores d'un matériau est décrit par une relation, appelée 1^{re} loi de Fick, entre le gradient d'une force motrice f responsable du mouvement de l'humidité et le flux massique induit J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Cette loi permet de déterminer le coefficient de diffusion de l'espèce considérée. Le processus de diffusion sera ensuite établi en considérant la conservation de la masse qui permettra alors de déterminer la 2^e loi de Fick.

À noter que le choix de la force responsable du mouvement de l'eau introduite dans l'équation de diffusion est source de beaucoup de confusion. Selon que l'on choisisse de travailler avec pour variable la concentration d'humidité, la teneur en eau dans le bois, la pression de vapeur d'eau ou l'humidité relative de l'air, les valeurs mesurées du coefficient de diffusion vont être différentes. Très souvent, c'est la teneur en eau dans le bois qui est considérée, pour des raisons de simplicité de mesure (Agoua, Zohoun, & Perré, 2001 ; Droin-Josserand, Taverdet, & Vergnaud, 1988).

Réellement, l'obéissance aux lois fickiennes de la diffusion de l'eau à travers le bois dans le domaine hygroscopique est discutée. Il a été mis en évidence qu'à humidité relative élevée, au-delà de 75 %, apparaissent des phénomènes non linéaires dans le cas du bois (Wadsö, 1993).

Pour prendre en compte ces phénomènes non fickiens, Frandsen (Frandsen, Damkilde, & Svensson, 2007) et Krabbenhoft (Krabbenhoft & Damkilde, 2004) proposent un modèle qui décrit les effets non fickiens observés dans le bois. Ce modèle sépare les transferts de l'eau liée et de la vapeur d'eau.

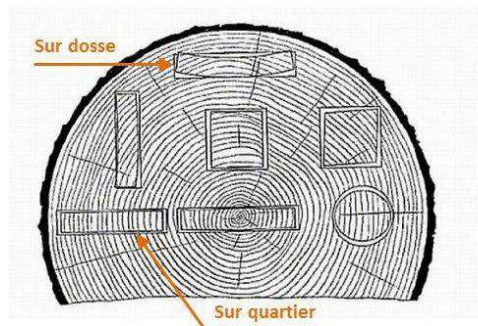
Par ailleurs, au vu de la courbe de sorption, le comportement diffusif du bois en phase de séchage diffère de celui du bois en phase d'humidification. En fait, la cinétique de diffusion est beaucoup plus importante pendant la phase de désorption amenant à un coefficient de diffusion jusqu'à cinq fois supérieur (Merakeb, 2006). Merakeb a aussi montré que la valeur du coefficient de diffusion est influencée par l'humidité relative et donc par la teneur en eau d'une part, et l'application de contraintes mécaniques d'autre part. La variation du coefficient de diffusion avec l'humidité est par ailleurs décrite par une forme exponentielle de la teneur en eau.

L'étude des phénomènes de diffusion hydrique dans le bois est importante car la variation du taux d'humidité dans le bois influence significativement la réponse mécanique de ce matériau, ce que nous détaillons dans les deux paragraphes suivants.

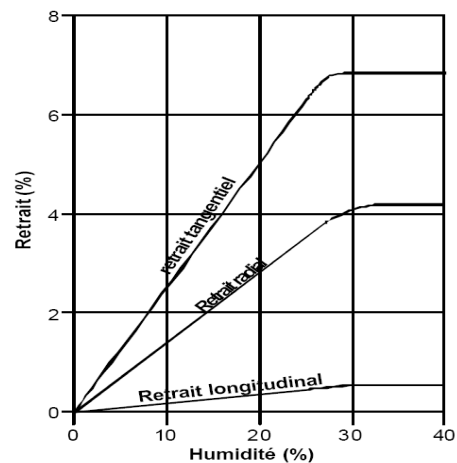
1.2.1.3 Variations dimensionnelles du bois : retrait et gonflement

Au cours d'une adsorption ou d'une désorption d'eau, le bois voit son volume varier, il subit un gonflement ou un retrait. Celui-ci n'est pas négligeable et doit être pris en compte dans l'étude du comportement de l'assemblage bois-béton. Cette rétractabilité (ou gonflement) n'ayant lieu que dans le domaine hygroscopique est due à la disparition (ou à la prise) d'eau liée. Ce phénomène directement lié à la teneur en cellulose et en lignine du bois, est d'autant plus important que le bois est dense et varie donc d'une essence de bois à l'autre.

De plus, les déformations induites par la perte ou la prise d'eau du bois dépendent de la zone où est prélevée la pièce de bois dans la grume (Figure 1-15a). Ceci est dû au fait que les variations dimensionnelles du bois diffèrent selon la direction radiale, tangentielle ou longitudinale. D'une manière générale, le retrait est environ deux fois supérieur dans le sens tangentiel par rapport au sens radial. Il est beaucoup plus faible dans la direction longitudinale (dans le sens des fibres) que dans les deux autres directions (Figure 1-15b).



(a)



(b)

Figure 1-15 : (a) Retrait dans le bois au cours du séchage <http://www.avbois.com> et (b) accroissement du volume en fonction de la teneur en eau (Merakeb, 2006).

Dans le domaine hygroscopique, il existe une relation quasi linéaire entre le taux d'humidité dans le bois et la variation dimensionnelle (Figure 1-15b).

À l'échelle macroscopique de quelques centimètres, on peut alors exprimer les déformations de la manière suivante :

$$1-2 \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \end{pmatrix} = \Delta h \begin{pmatrix} \alpha_R & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L \end{pmatrix}$$

où α_R , α_T et α_L représentent les coefficients de dilatation dans les trois directions privilégiées du bois, Δh est la variation de teneur en eau dans le bois,

et ε_R , ε_T , ε_L sont les déformations induites selon les directions R, T et L.

À l'échelle microscopique, l'anisotropie du bois est caractérisée par une variabilité dans les valeurs des coefficients de dilatation au sein d'un même tronc. Pour exemple, sur la section transversale, le coefficient de dilatation peut varier du simple au double (Figure 1-16 : cas du coefficient de dilatation longitudinale).

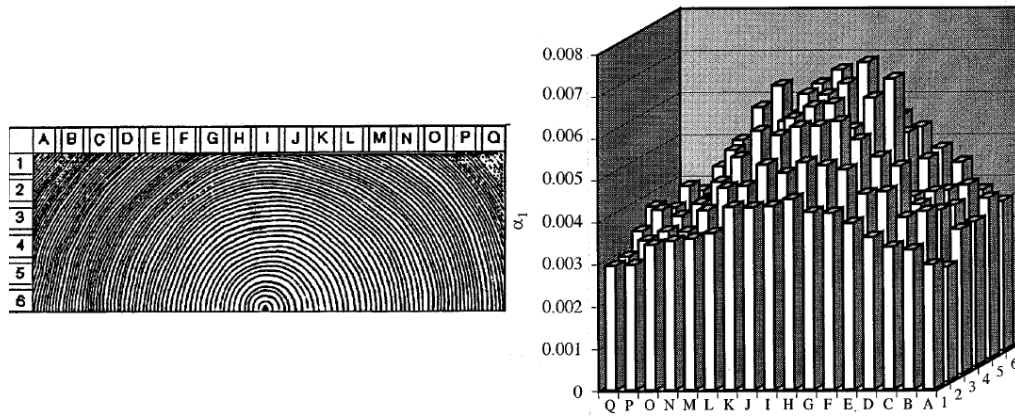


Figure 1-16 : Variation du coefficient de dilatation longitudinale sur une section transversale du bois d'épicéa (Ormarsson, Dahlblom, & Petersson, 1999).

1.2.1.4 Comportement mécanique du bois

En traction, comme en compression, la relation contrainte-déformation est décrite par un comportement élasto-plastique avec un domaine plastique beaucoup moins marqué en traction qu'en compression.

a) Modules d'élasticité

Le bois est identifié comme un matériau orthotrope. Dans le domaine élastique, les composantes du tenseur des déformations s'expriment par la loi de Hooke en fonction des composantes du tenseur des contraintes à l'aide de neuf constantes élastiques (notation de Kelvin Voigt) (Natterer, 2000) :

$$1-3 \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{pmatrix}$$

où ε_L , ε_R , et ε_T sont les déformations selon les trois axes,

γ_{RT} , γ_{LT} , et γ_{LR} sont les distorsions selon les trois plans,

E_L , E_R , et E_T sont les modules d'Young selon les trois axes,

G_{RT} , G_{TL} , et G_{RL} sont les modules de cisaillement selon les trois plans,

ν_{TR} , ν_{LT} , ν_{RL} , ν_{RT} , ν_{TL} , ν_{LR} , sont les coefficients de poisson,

σ_L , σ_R et σ_T sont les contraintes normales selon les trois axes,

Et τ_{RT} , τ_{LT} , et τ_{LR} sont les contraintes de cisaillement selon les trois plans.

Pour un matériau orthotrope, la matrice de souplesse est symétrique, les constantes élastiques vérifient donc :

$$1-4 \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}, \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L} \text{ et } \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}$$

Pour ordre de grandeur, le tableau suivant présente les caractéristiques élastiques moyennes de bois résineux et feuillus mesurées pour un taux d'humidité de 12 %.

Tableau 1-1 : Ordres de grandeur des caractéristiques élastiques de feuillus et des résineux mesurés à 12 % de teneur en eau (Guitard & El Amri, 1987).

	ρ (-)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	E_L (MPa)	G_{TL} (MPa)	G_{LT} (MPa)	G_{RL} (MPa)	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RL}	ν_{RT}	ν_{TL}	ν_{LR}
Feuillus	0,65	1810	1030	1440	366	971	1260	0,3	0,4	0,0	0,6	0,0	0,3
Résineux	0,39	932	423	8509	178	556	790	0,3	0,4	0,0	0,6	0,0	0,5

De la même façon que pour les coefficients de dilatation, les modules varient au sein d'un même tronc selon la position par rapport au cœur du bois de l'échantillon testé (Figure 1-17). L'hétérogénéité du bois est très marquée et justifie la forte dispersion de résultats expérimentaux.

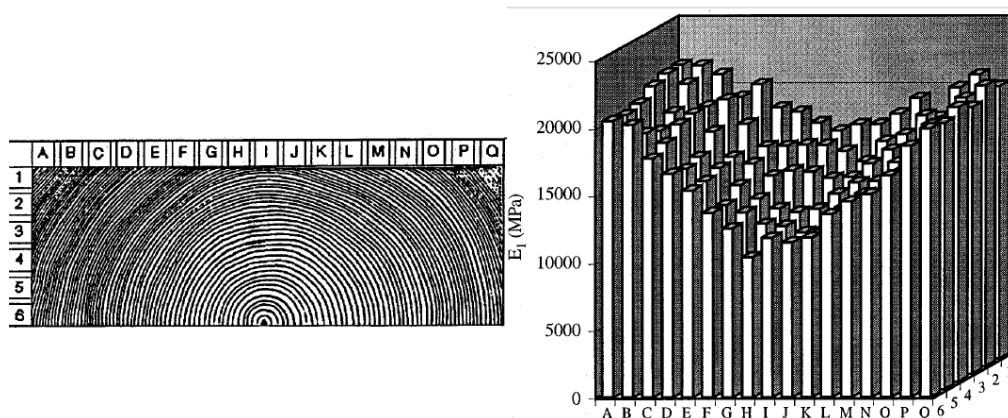


Figure 1-17 : Variation du module élastique longitudinal sur une section transversale du bois d'épicéa (Ormarsson, Dahlblom, & Petersson, 1999).

b) Résistances

La résistance dans le bois est très différente selon la direction dans laquelle on applique l'effort. Généralement on différencie la résistance parallèle aux fibres donc dans le sens longitudinal, de la résistance perpendiculaire aux fibres, qui inclut les deux directions radiale et tangentielle. Comme pour toutes les propriétés du bois, la dispersion des résultats est importante en raison du caractère hétérogène du matériau. En effet, la résistance dans le bois est influencée par la qualité de celui-ci. Ainsi, d'une essence à

l'autre, ou au sein d'une même espèce selon sa localisation et donc ses conditions de croissance, voire même au sein d'un même arbre, les planches et échantillons testés issus de zones différentes dans le tronc, vont être marqués par la présence de nœuds ou défauts. La résistance va varier. Cette variabilité est d'autant plus grande que l'échantillon testé est petit en raison de défauts locaux. Pour ces raisons, les méthodes de dimensionnement se basent sur des valeurs caractéristiques de résistance et non pas sur des valeurs moyennes. Ainsi, le bois de construction est classé selon la norme NF EN 518.

Ces classements peuvent se baser sur l'aspect visuel du bois. L'observation porte essentiellement sur la présence de nœuds, la pente du fil, les fentes, les attaques d'insectes ou de champignons. Autant de facteurs que l'on sait plus ou moins bien corrélés à la résistance du bois. Il est aussi possible de classer les bois par ce qu'on appelle le classement « par machine ». La résistance est corrélée à plusieurs paramètres, tels que la masse volumique du bois, la vitesse de propagation d'ondes ultrasonores dans le bois, ou la rigidité flexionnelle obtenue par un essai de flexion statique par exemple. Ces méthodes ont l'avantage d'estimer une résistance limite d'un bois sans avoir à faire un contrôle destructif.

Pour ordre de grandeur, les tableaux 1-2 et 1-3 donnent des valeurs caractéristiques de résistance de bois massifs et lamellés-collés.

Tableau 1-2 : Classes de résistance pour (a) bois massif résineux définies en NF EN 338.

Symbole	Désignation	Unité	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	14	16	18	22	24	27	30	35	40
$f_{t,0,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	8	10	11	13	14	16	18	21	24
$f_{t,90,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
$f_{c,0,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	16	17	18	20	21	22	23	25	26
$f_{c,90,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2.0	2.2	2.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
$f_{v,k}$	Contrainte de Cisaillement	N/mm ²	1.7	1.8	2.0	2.4	2.5	2.8	3.0	3.4	3.8
$E_{0,mean}$	Module moyen axiale	kN/mm ²	7	8	9	10	11	11.5	12	13	14
$E_{0,05}$	Module axiale au 5 ^{ème} pourcentile	kN/mm ²	4.7	5.4	6.0	6.7	7.4	7.7	8.0	8.7	9.4
$E_{90,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0.23	0.27	0.30	0.33	0.37	0.38	0.40	0.43	0.47
G_{mean}	Module de cisaillement	kN/mm ²	0.44	0.50	0.56	0.63	0.69	0.72	0.75	0.81	0.88
ρ_k	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	290	310	320	340	350	370	380	400	420
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne	kg/m ³	350	370	380	410	420	450	460	480	500

Tableau 1-3 : Classes de résistance de bois lamellés-collés définies en NF EN1194.

Symbole	Désignation	Unité	Lamellés collés homogènes				Lamellés collés panachés			
			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
$f_{m,g,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	24	28	32	36	24	28	32	36
$f_{t,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	16.5	19.5	22.5	26.0	14.0	16.5	19.5	22.5
$f_{t,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0.40	0.45	0.50	0.60	0.35	0.40	0.45	0.50
$f_{c,0,g,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	24	26.5	29	31	21	24	26.5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2.7	3.0	3.3	3.6	2.4	2.7	3.0	3.3
$f_{v,g,k}$	Contrainte de Cisaillement	N/mm ²	2.7	3.2	3.8	4.3	2.2	2.7	3.2	3.8
$E_{0,g,mean}$	Module moyen axiale	kN/mm ²	11.6	12.6	13.7	14.7	11.6	12.6	13.7	14.7
$E_{0,g,05}$	Module axiale au 5 ^{ème} pourcentile	kN/mm ²	9.4	10.2	11.1	11.9	9.4	10.2	11.1	11.9
$E_{90,g,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0.39	0.42	0.46	0.49	0.32	0.39	0.42	0.46
$G_{g,mean}$	Module de cisaillement	kN/mm ²	0.75	0.78	0.85	0.91	0.59	0.72	0.78	0.85
$\rho_{g,k}$	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	380	410	430	450	350	380	410	430

c) Comportements mécaniques et taux d'humidité

Les valeurs de référence sont généralement données à un taux d'humidité de 12 %. Cependant les propriétés mécaniques dans le bois sont fortement conditionnées par son état hydrique.

De nombreuses études ont porté sur les effets de l'humidité sur le bois. Gerhards (Gerhards, 1982) propose une revue bibliographique sur l'étude des effets de l'humidité et de la température sur les propriétés mécaniques du bois. La plupart des propriétés mécaniques sont présentées, les modules élastiques longitudinaux, transversaux et de cisaillement, ainsi que les résistances en traction, en compression, en cisaillement. L'étude montre qu'une structure en bois, soumise aux conditions climatiques extérieures, et dont le taux d'humidité varie entre 12 % et 20 %, voit certaines de ses propriétés varier de façon importante, entre 15 et 20 % pour les modules d'élasticité et allant jusqu'à 40 % pour les résistances (Figure 1-18). La figure 1-18 illustre toutefois que la dispersion des résultats est considérable.

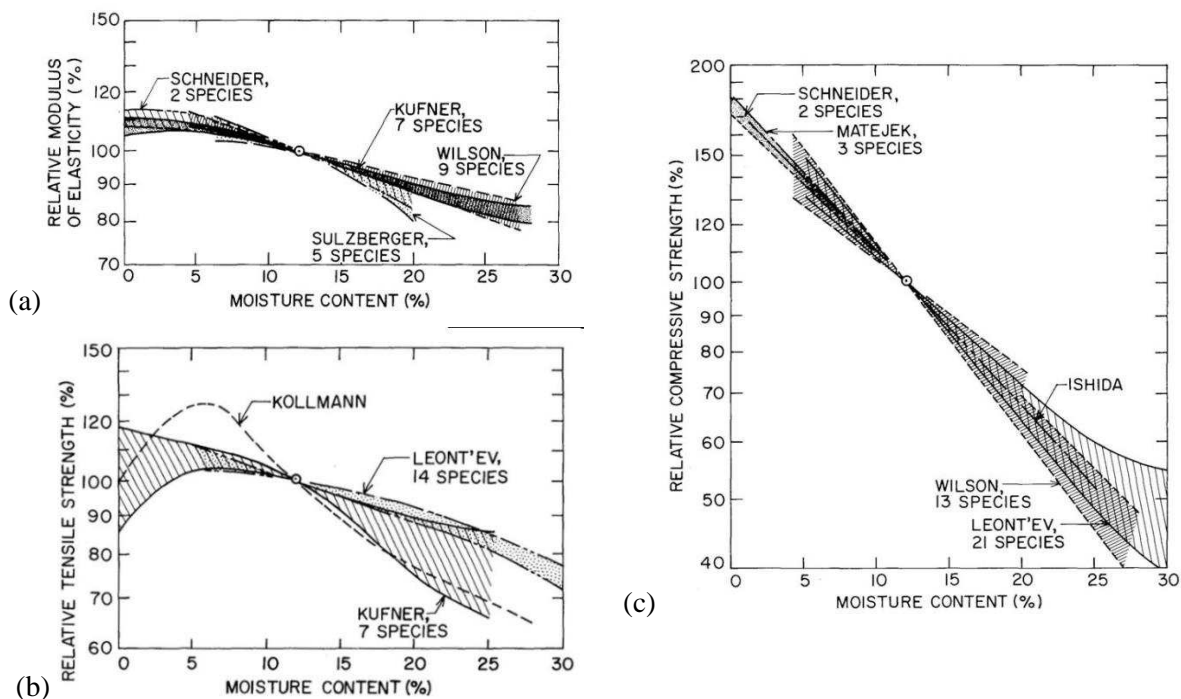


Figure 1-18 : Variation du module d'Young longitudinal (a) et de la résistance en traction (b) et en compression (c) en fonction du taux d'humidité dans le bois (Gerhards, 1982).

Aussi, pour des variations de teneur en humidité allant de 6 % à 20 %, il est possible pour les modules d'élasticité, d'adopter les corrections suivantes (Guitard, 1987) :

$$\begin{aligned} 1-5 \quad E_L^u &= E_L^{12} [1 - 0,015(h - 12)] \\ E_v^u &= E_\eta^{12} [1 - 0,030(h - 12)] \\ G_\eta^u &= G_\eta^{12} [1 - 0,030(h - 12)] \end{aligned}$$

avec G et E les modules d'élasticité longitudinaux et transversaux,

h la teneur en eau dans le bois,

ν = (R ou T) et η = (RT, TL ou LR).

d) Les effets différés et les couplages hydromécaniques

Dans le cas de l'étude de la durabilité de l'assemblage bois-béton sous chargement hydrique, les déformations dans le bois sont donc des déformations élastiques et hydriques. Pour ces déformations, tous les paramètres nécessaires sont relativement bien connus. Cette description est cependant partielle pour la prédiction des contraintes de séchage car il faut tenir compte des effets différés (viscoélasticité) et des mécanismes mécanosorptifs.

L'utilisation de modèles viscoélastiques pour décrire le comportement au fluage du bois est justifiée par l'influence de la vitesse de déformation sur sa réponse mécanique. Les modèles de comportement viscoélastiques sont généralement basés sur des modèles rhéologiques, tels que le modèle de Maxwell, le modèle de Kelvin-Voigt ou le modèle de Burger (Huet & Navi, 1990 ; Bardet & Gril, 2002).

Comme toutes les propriétés du bois, le comportement au fluage du bois est lié à son taux d'humidité. Précisément la viscosité augmente avec l'humidité dans le bois. Sous l'effet de chargements hydriques, les phénomènes de fluage liés au comportement mécanique du bois sont aussi couplés aux phénomènes mécanosorptifs du bois du fait du comportement hygroscopique de celui-ci (Montero, 2011).

On décrit ici plus précisément les effets de la mécanosorption dans le bois. Autrement dit, sous chargements mécaniques constants ou variables dans le temps, la réponse en déformation du bois ne sera pas la même selon les chargements hydriques imposés.

Le bois soumis à des chargements hydriques présente un comportement mécanique différé, traduit par exemple :

- par une augmentation du fluage lorsque le bois subit des chargements hydriques variables (Figure 1-19) ;
- par une modification des déformations hydriques dans le cas de retrait ou de gonflement hydrique sous contrainte.

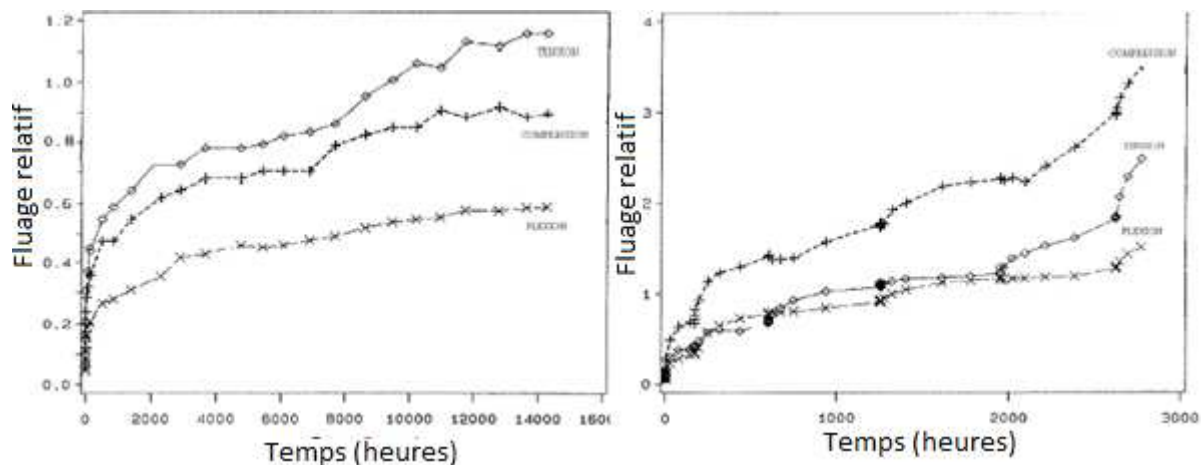


Figure 1-19 : Essai de fluage en flexion sur des éprouvettes soumises à humidité constante (11 %) (à gauche) et variable (à droite) (Hoffmeyer, 1990).

L'étude du mécanisme et de l'origine de l'effet couplé de la contrainte avec le processus de sorption du bois a fait l'objet de nombreuses études. À l'échelle macroscopique, la mécanosorption est décrite et intégrée dans les modèles de comportement du bois par de nombreux auteurs (Ormarsson, Dahlblom, & Petersson, 1998 ; Torratsi & Svensson, 2000; Moutee, Fafard, Fortin, & Laghdir, 2005 ; Colmars, 2011). La compréhension physique du phénomène mécano-sorptif est aujourd'hui encore incomplète, bien que de nombreux modèles phénoménologiques tentent de l'expliquer dans la bibliographie.

Un autre phénomène est à prendre en considération dans le cas de cycles d'humidification séchage : le « compression set ». Ce phénomène est défini comme étant la déformation permanente en compression générée dans le plan transverse lors d'essais de retraits-gonflements empêchés induits par des variations hydriques (Colmars, 2011). Outre le couplage mécano-sorptif proprement dit, des effets d'écrasement de la structure cellulaire sont susceptibles de produire et entraîner des niveaux de déformation importants.

L'effet « mécano-sorptif » devrait donc être aussi considéré dans le cas des structures mixtes bois-béton collés étant donnés les phénomènes de retrait-gonflement empêché induit par l'interface collée. En première approximation, cet effet non considéré dans les modélisations va dans le sens de la sécurité dans les estimations des contraintes induites (surestimation de contraintes).

1.2.2 Le béton

1.2.2.1 Généralités sur le béton

Le béton est un matériau composite aggloméré à base de granulats (sable, gravillon, gravier), d'eau et de ciment (liant hydraulique servant d'agglomérant). Au moment du gâchage, lorsque l'eau entre en contact avec le ciment, il se produit des réactions chimiques entre l'eau et le ciment qui conduisent à la prise du matériau : c'est le phénomène d'hydratation. L'eau ayant réagi avec le ciment est qualifiée d'eau « liée » ou « d'hydratation », l'eau résiduelle est considérée comme libre dans les pores du béton (la quantité d'eau libre présente dans les pores est fonction de l'humidité relative extérieure). Pendant la réaction chimique,

les principaux composés du ciment réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent le durcissement du matériau ; la pâte de ciment hydratée passe de l'état liquide à l'état solide (Baroghel-Bouny, 1994). Cette réaction est lente, les résistances mécaniques et le module du béton augmentent rapidement au début, et au bout de sept jours atteignent 75 % de la résistance finale. Les valeurs de résistances et de modules pris comme référence dans les calculs sont celles mesurées à 28 jours, où l'on considère qu'elles sont quasiment stabilisées à la valeur finale.

À l'échelle microscopique, le béton est un matériau hétérogène où les granulats forment le squelette granulaire et la pâte de ciment hydratée forme la matrice cimentaire qui enrobe les granulats de façon à remplir les vides entre les granulats (Figure 1-20).

À l'échelle macroscopique le béton est considéré comme un matériau homogène isotrope.

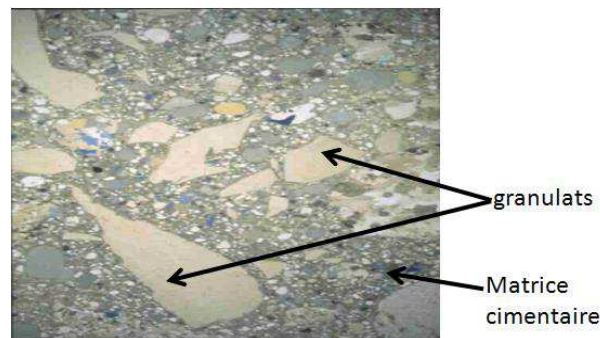


Figure 1-20 : Photo d'un béton, échelle microscopique.

1.2.2.2 Comportement mécanique des bétons

Les caractéristiques mécaniques du béton (modules élastiques et résistances) dépendent de la composition du matériau (type de ciment, taille et géométrie des granulats, quantités, et méthode de fabrication), et notamment de son rapport E/C qui gouverne sa porosité, où E est la masse d'eau et C la masse de ciment (Neville, 2000). Depuis le XIX^e siècle, le béton connaît un réel développement. Les progrès dans les méthodes de formulation ont permis de développer une gamme de matériaux présentant des résistances caractéristiques plus importantes. On distingue alors plusieurs familles de bétons dont les bétons ordinaires, les bétons à haute performance (BHP), les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés à ultra-haute performance (BFUHP ou BFUP).

a) Résistances et modules

La résistance en compression d'un béton ordinaire varie de 20 à 40 MPa, tandis que celle du BHP atteint 80 MPa. En fait, l'ajout de plastifiant dans la composition du béton permet de diminuer la quantité d'eau lors de la fabrication, tout en gardant la même ouvrabilité du béton. Ceci a pour effet de diminuer la porosité du béton et donc d'augmenter les performances mécaniques. L'ajout de fibres métalliques, synthétiques ou minérales dans le béton permet d'augmenter encore la résistance caractéristique à la compression du béton allant de 150 à 250 MPa pour le BFUP. Ce béton présente l'avantage d'être un béton ductile notamment en traction (Benkechkache & Houari, 2009). Le tableau 1-4 présente des ordres de grandeur des valeurs des modules et résistances des différents bétons.

Tableau 1-4 : Caractéristiques mécaniques des différents bétons existants.

	Mortier	Béton ordinaire	BAP	BHP	BFUP
Module d'Young (GPa)	30	30 à 40	30 à 40	45	50 à 70
Résistance en compression f_{c28} (MPa)	5 à 15	16 à 40	Environ 50	45 à 100	>180
Résistance à la traction (MPa)	2 à 6	<3	<4	<5	>10

b) Comportement mécanique des bétons

En compression, les bétons ordinaires suivent une loi de comportement décrite par une courbe d'allure parabolique sur laquelle on distingue trois phases (Figure 1-21a) :

- une phase élastique traduite par une courbe linéaire au début dont la loi de Hooke $\sigma=E\varepsilon$ est utilisée pour décrire le phénomène ;
- une phase plastique marquée par une incurvation de la courbe qui augmente de façon non linéaire jusqu'au pic de résistance ;
- une phase « adoucissante » après le pic de résistance pendant laquelle la courbe décroît progressivement. Durant cette phase, des fissures parallèles à l'effort de sollicitation apparaissent, dans lesquelles les déformations sont concentrées et augmentent rapidement.

Ces trois phases sont aussi présentes dans le cas du BFUP, mais la phase plastique est plus courte.

La déformation correspondant à la résistance maximale est de l'ordre de 4,5 % pour le BFUP contre 0,2 % pour le béton ordinaire.

En traction le comportement du béton ordinaire est décrit par deux étapes importantes (Figure 1-21b). On observe sur la première partie de la courbe, jusqu'au pic de résistance, un comportement linéaire. Après le pic, la contrainte supportée par l'échantillon chute brutalement (phase adoucissante) et traduit un comportement fragile du béton.

Le comportement du BFUP est différent, celui-ci est caractérisé par trois phases distinctes (Figure 1-21b) :

- une phase élastique jusqu'au pic de résistance qui correspond à la première fissuration de la matrice ;
- une phase écrouissante définie sur la courbe par un plateau sur lequel la résistance à la traction reste constante ou augmente légèrement. Celle-ci correspond après la première fissuration, à la formation d'une multitude de fines fissures réparties dans la matrice grâce à la présence des fibres ;

- une phase finale « adoucissante » pendant laquelle, la contrainte chute lentement par rapport au cas du béton ordinaire.

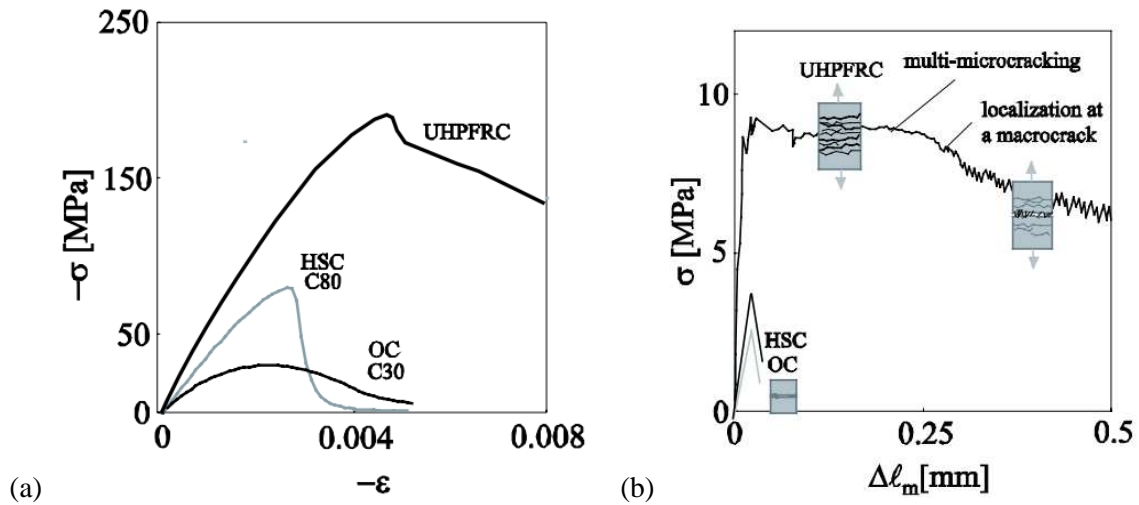


Figure 1-21 : (a) Comportement en compression et (b) en traction du BFUP (UHPFRC) en comparaison avec le béton ordinaire (OC) et le BHP (HSC) (Spasojevic A., 2008).

Dans un assemblage collé bois-béton, le béton subit des contraintes de traction et de compression importantes induites par le gonflement et le retrait du bois soumis à des variations climatiques. L'utilisation du BFUP ici apparaît nécessaire dans le cas où les contraintes au niveau de l'interface deviennent trop importantes.

1.2.2.3 Phénomènes de retrait

Au cours de sa vie, le béton subit des variations dimensionnelles qui sont notamment liées à deux phénomènes : le phénomène d'hydratation et le phénomène de dessiccation, traduit par l'évaporation de l'eau libre. Ces variations dimensionnelles se traduisent par un retrait du béton, selon :

- le retrait endogène généré par le matériau lui-même en l'absence d'échange avec le milieu extérieur. Les effets mécaniques du retrait endogène se font essentiellement ressentir au jeune âge. Ce processus évolue rapidement pendant les premiers jours, pour se stabiliser au bout d'un mois (l'évolution est extrêmement lente au-delà d'un mois). Précisément, des déformations de retrait se créent durant la phase d'hydratation car les hydrates formés sont moins volumineux que les composants à l'état initial. De nombreux travaux traitant du comportement du béton au jeune âge peuvent être cités (Baroghel-Bouny, Mainguy, T, & Coussy, 1999 ; Ostergaard, Lange, & Altoubat, 2001 ; Garcia Boivin, 2001 ; Zreiki, 2009). Ce phénomène est d'autant plus important que le rapport E/C est faible (Figure 1-22a). Dans le cas d'un BHP et du BFUP, étant donné la faible quantité d'eau disponible à l'hydratation du ciment, les pores s'assèchent progressivement et sont soumis à des forces capillaires plus importantes que dans le cas du béton ordinaire, ce qui amène à des retruits endogènes plus importants (500 $\mu\text{m}/\text{m}$ contre 100 à 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un béton ordinaire) ;

- le retrait de dessiccation est lié à des échanges de vapeur d'eau entre la matrice cimentaire et le milieu extérieur et donc à la teneur en humidité du béton, qui peuvent conduire à un retrait ou un gonflement du matériau. Ainsi plus le rapport E/C est grand, plus le retrait de dessiccation est important (Figure 1-22b). Les BHP développent donc une déformation de retrait de dessiccation moins importante que les bétons ordinaires (Le Roy, 1996). Il s'agit d'un phénomène très lent, fortement lié à l'humidité relative de l'air, qui au sein d'une structure est surtout observé dans les zones exposées au séchage. Il conduit à un retrait apparent de l'ordre de 200 à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ selon le type de béton. La surface d'un parement tend à contracter et est donc soumise à des contraintes de traction induisant des micro-fissures de peau. Cette fissuration a un effet sur les modules d'élasticité et les résistances en compression et en traction de la structure.

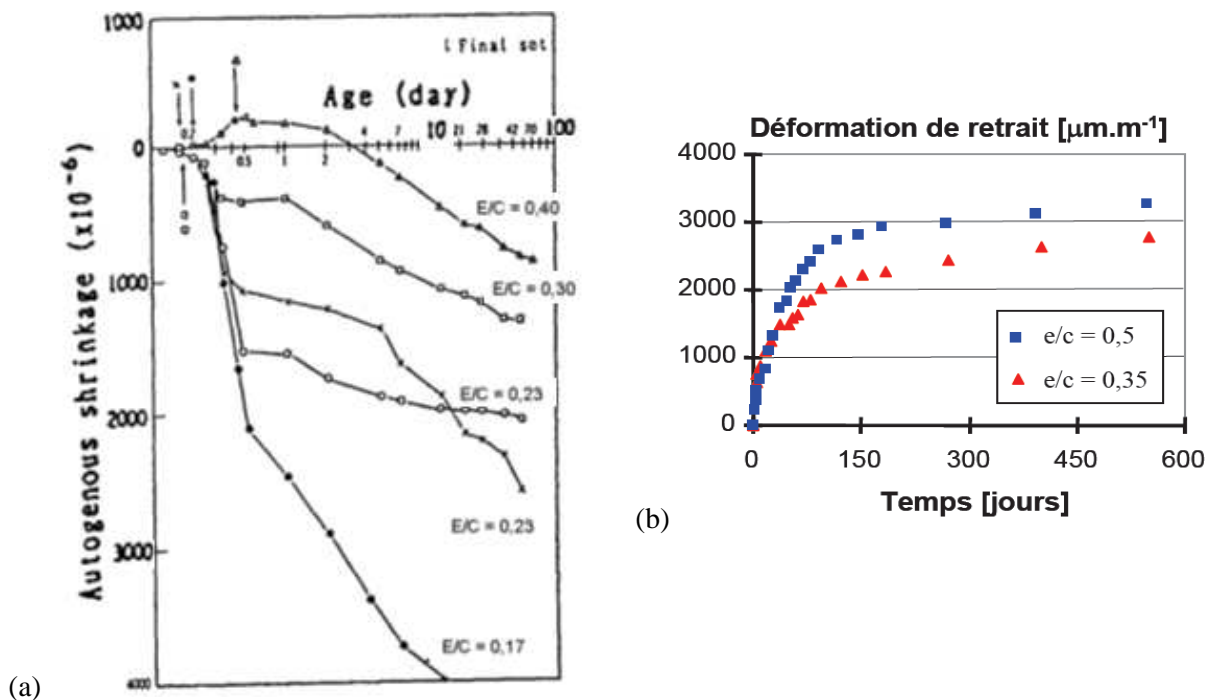


Figure 1-22 : Effet du rapport E/C (a) sur le retrait endogène d'une pâte de ciment (Tazawa, Miyazawa, & Kasai, 1995) et (b) de dessiccation d'une pâte de ciment (Benboudjema, 2002).

Dans le cas d'un assemblage collé bois-béton, le retrait peut être empêché par l'interface, en fonction des propriétés mécaniques et d'adhésion de la colle. Ces phénomènes de retraits empêchés induisant des contraintes de traction dans le béton, peuvent conduire à sa fissuration et nuire à la durabilité d'une structure.

En particulier, dans le cas où le béton est collé frais, il est essentiel de tenir compte du comportement au jeune âge du béton, notamment du retrait endogène.

1.2.2.4 Propriété de fluage des bétons

Le béton, soumis à une charge mécanique de longue durée se comporte comme un matériau viscoélastique. On estime la déformation de fluage en moyenne à 0,4 et 0,5 %. Au bout d'un mois, le béton atteint environ 40 % de la déformation de fluage, et 80 % au bout de 6 mois. Les déformations

différées liées au fluage sont cependant fortement influencées par l'âge du béton au moment du chargement, par le niveau de contrainte appliqué et les conditions environnementales (température, hygrométrie...).

La déformation de fluage se décompose en deux composantes :

- **le fluage propre** d'un béton soumis à des conditions de température et d'humidité, tel qu'on puisse considérer qu'il n'existe pas d'échange hydrique ou thermique entre l'éprouvette et le milieu extérieur. Cette déformation différée pour différents bétons est caractérisée par deux régimes cinétiques distincts. Un fluage à court terme qui se développe rapidement, pendant quelques jours après le chargement, suivi d'un fluage à long terme caractérisé par une cinétique très lente. Le mécanisme de fluage propre est fortement lié à la teneur en eau du béton (Figure 1-23a). En effet, un béton sec, dont la quantité d'eau non liée (eau évaporable) est quasi nulle, comme c'est le cas pour les BHP et les BFUP, ne flue pratiquement pas ;
- **le fluage de dessiccation** d'un béton soumis à des conditions de séchage. Lorsqu'une éprouvette est soumise simultanément à la dessiccation et à un chargement mécanique, le mécanisme de fluage est amplifié. On mesure une déformation différée plus importante que celle obtenue en sommant les déformations mesurées de fluage propre et de retrait de dessiccation (Figure 1-23b).

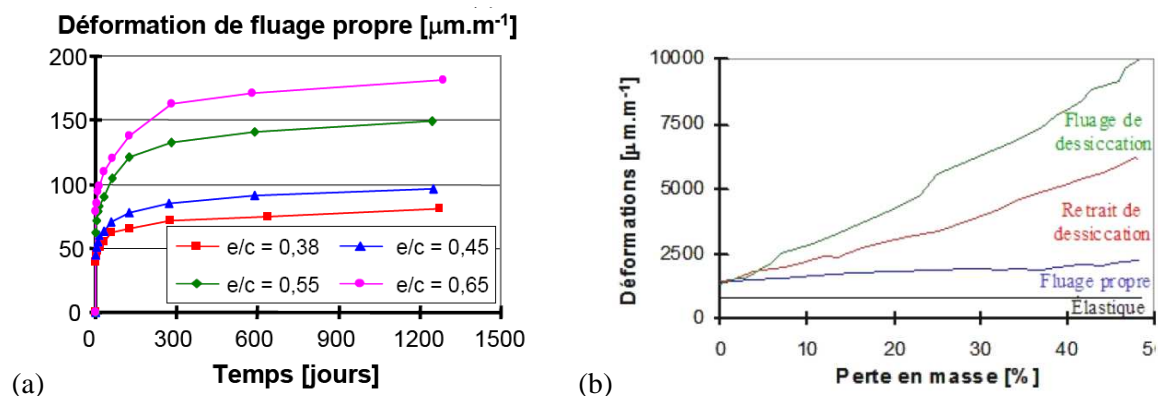


Figure 1-23 : (a) Effet d'E/C sur le fluage propre (Benboudjema, 2002) (b) comparaison du fluage propre et du fluage de dessiccation mesurés sur des pâtes de ciment.

Le comportement à court terme et à long terme du béton est fortement dépendant du processus d'hydratation et des conditions thermo-hydrromécaniques auxquelles il est soumis. Le comportement différé du béton, avec des déformations qui peuvent atteindre 0,5 %, peut être néfaste dans la tenue à long terme d'une structure mixte bois-béton collée. Il apparaît important de minimiser le fluage du béton en utilisant par exemple un béton sec comme le BFUP.

1.2.3 Les colles

Le collage est une technologie complexe qui consiste à mettre en contact deux surfaces solides (les substrats) grâce à un adhésif (la colle). D'une part, la pénétration de la colle dans les pores des matériaux implique un phénomène d'ancrage mécanique. D'autre part, il se crée des liaisons physiques ou chimiques

aux interfaces substrat-adhésif. L'adhésion d'une colle qui est à l'état liquide, plus ou moins visqueuse lors de la mise en œuvre, va être caractérisée par son interaction avec les deux substrats et sa mouillabilité (la capacité à s'étaler sur le solide). Sa cohésion va s'opérer par une réaction chimique qui induit une solidification de la colle, la polymérisation.

Le produit collé doit résister aux sollicitations mécaniques, physiques et chimiques auxquelles il sera soumis pendant toute sa durée de vie. Ainsi, sa solidité et sa durabilité dépendront essentiellement des caractéristiques mécaniques de la colle, notamment des propriétés d'adhésion (Cognard J. , 2000).

Il existe de nombreux types d'adhésifs, tous constitués de polymères organiques, qui appartiennent à l'une des trois catégories suivantes :

1. Les thermodurcissables deviennent rigides lorsqu'ils sont soumis à une élévation de température au cours de la réticulation ou un peu après. Leur structure est tridimensionnelle. Du fait de leur rigidité, ils ont de bonnes propriétés mécaniques.
2. Les thermoplastiques sont des polymères déformables à chaud qui retrouvent leur rigidité par refroidissement. Ils présentent des chaînes linéaires et leurs propriétés mécaniques sont inférieures à celles des thermodurcissables.
3. Les élastomères sont des résines souples et peu résistantes mais présentant des propriétés d'adhésion intéressantes.

Les principales familles d'adhésifs utilisées dans le domaine du génie civil sont les « thermodurcissables » et les « thermoplastiques ».

Dans ce paragraphe nous décrirons dans un premier temps les différentes hypothèses expliquant les « mécanismes d'adhésion ». Nous nous limiterons ensuite au cas du collage structural, pour définir les propriétés des colles utilisées dans le domaine du génie civil.

1.2.3.1 Mécanismes d'adhésion

Lorsque l'adhésif entre en contact avec un substrat poreux et rugueux, les mécanismes d'adhésion sont complexes. Plusieurs approches sont alors envisagées pour expliquer l'adhésion, celle-ci impliquant les créations de liaisons chimiques et dans certains cas électrostatiques (approche physico-chimique), le « mouillage » de la surface (approche thermodynamique), la pénétration de la colle dans le substrat avant sa solidification : l'ancrage mécanique (approche mécanique) et d'autres aspects qui sont détaillés dans de nombreux ouvrages et thèses (Cognard J. , 2000; Couvrat, 1992 ; Bruneaux, 2004; Chataigner S. , 2008 ; Popineau, 2005).

Toutes ces approches montrent que les phénomènes d'adhésion ne sont pas encore bien élucidés. On retiendra cependant que l'adhésion est gouvernée principalement par le contact entre l'adhésif et le substrat (le mouillage et l'ancrage mécanique) et par la formation de liaisons plus ou moins fortes très nombreuses entre l'adhésif et le substrat. Aussi, l'étude des mécanismes d'adhésion permet de travailler sur l'optimisation des performances d'un joint de colle, notamment en passant par une bonne préparation de surface pour améliorer la « mouillabilité » et « l'ancrage mécanique ». La surface à encoller pourra alors être traitée mécaniquement (par ponçage ou sablage), et chimiquement (par dégraissage).

1.2.3.2 Les colles structurales

Dans le cas du collage structural, le collage doit conférer à l'assemblage considéré une résistance mécanique suffisante (au minimum du même ordre de grandeur que celles des matériaux constituant la structure) dans les conditions environnementales de service (Cognard J., 1994). La colle devient alors partie intégrante de la structure. On ajoute à cette définition des notions de durabilité de l'assemblage dans des conditions environnementales différentes. La résistance mécanique de l'assemblage et sa durabilité dépendent de la nature des matériaux considérés, des efforts d'adhésion qui existent entre ces matériaux et la colle, et de l'évolution des matériaux constituant la structure en environnement extérieur (dans notre cas, le bois, le béton et la colle).

Ce sont parmi les thermodurcissables et les thermoplastiques que l'on trouve les colles les plus répandues dans le domaine du génie civil. Parmi ces colles, on trouve les colles époxy, les polyuréthanes, et les composés acryliques entre autres. Nous décrirons dans ce paragraphe les caractéristiques principales de ces différentes colles et les propriétés de vieillissement.

Chaque type de colle présente des caractéristiques spécifiques et bénéficie donc d'utilisations spécifiques. Les adhésifs structuraux sont caractérisés par de très bonnes propriétés mécaniques notamment en termes de résistances, ceci dans le but d'assurer la résistance du joint de colle. En revanche, l'adhésif, partie intégrante de l'assemblage, doit résister aux contraintes auxquelles il est soumis au cours de sa vie. Il présente alors des comportements mécaniques variables selon l'usage. Ainsi on choisira une colle souple, avec un faible module d'Young pour des assemblages soumis à des dilatations importantes, ou à des chocs et vibrations. Une colle rigide avec d'excellentes propriétés d'adhésion servira plutôt à assurer une interface quasi parfaite pour garantir la continuité entre les deux matériaux collés. Cette caractéristique est intéressante dans la construction, notamment pour des éléments de structure. Nous décrivons ci-dessous les usages et propriétés essentielles de trois types de colles que nous avons testées et utilisées pour assembler le bois et le béton.

Les colles époxy

Les colles époxy sont des résines thermodurcissables. Elles sont mono ou bi-composantes constituées d'une base époxyde et d'un durcisseur. Lorsqu'elles sont bi-composantes, le mélange des deux produits donne lieu à une réaction exothermique qui permet la réticulation. Le mélange se fait alors au moment du collage et la réaction peut être accélérée par un apport de chaleur. Pour les mono-composantes, la base et le durcisseur sont déjà mélangés et la réaction se produit avec un apport de chaleur. Elles sont généralement utilisées pour les assemblages métal-métal ou métal-plastique devant résister à de fortes contraintes mécaniques. Ces colles présentent de nombreux avantages, notamment une bonne tenue aux environnements et une rigidité importante. Elles sont par ailleurs utilisées à l'extérieur, dans le domaine du génie civil pour la reprise de bétonnage, pour le renforcement de poutres et de piliers. Elles servent également à la réalisation de matériaux composites combinés à de la fibre de carbone. Les colles époxy sont de loin les résines les plus utilisées dans le domaine du génie civil grâce notamment à leur bonne adhésion avec un grand nombre de matériaux et à leur facilité de mise en œuvre.

Les colles polyuréthanes

Les colles polyuréthanes résultent de la condensation entre un monomère isocyanate et un monomère hydroxyde ou polyol. Pour des raisons de mise en œuvre, certains fabricants développent des gammes de polyuréthanes mono-composants mais généralement ce sont des systèmes bi-composants qui sont utilisés. Les polyuréthanes bi-composants présentent des caractéristiques mécaniques plus élevées (Tableau 1-5). Du fait de leur bonne tenue à la déchirure et au pelage, ces résines sont utilisées pour l'assemblage de deux matériaux, l'un rigide, l'autre souple (par exemple, elles conviennent très bien aux assemblages métal-plastique). Les résines polyuréthanes sont souples et possèdent une bonne résistance aux phénomènes de vieillissement. Ainsi, elles sont prescrites pour des assemblages soumis à de la dilatation comme pour le bois lamellé-collé. Elles sont aussi résistantes aux chocs et vibrations et trouvent de nombreuses utilisations dans le domaine naval, matériel de transports...

Les composés acryliques

Il existe plusieurs types de colles à base acrylique, les cyanoacrylates, les anaérobies et les acryliques modifiées. Elles sont utilisées dans l'industrie de précision notamment sur des petites pièces et pour assembler le caoutchouc. Elles présentent de très bonnes résistances mécaniques notamment au cisaillement et au pelage, mais résistent peu aux chocs. Leur vitesse de prise est très rapide, de quelques minutes, ce qui rend la mise en œuvre difficile.

Pour résumer, le tableau 1-5 présente des ordres de grandeur de valeurs de propriétés mécaniques des différentes colles présentées dans ce paragraphe.

Le choix d'une résine structurale pour la connexion du bois et du béton semble évident. En effet, cet assemblage est développé pour servir en tant qu'élément de structure. L'idée d'une connexion de ces deux matériaux par collage, via une résine époxy, rigide et fortement adhésive, est née de l'envie d'améliorer la continuité de l'interface par rapport aux cas d'une connexion usuelle de type connecteurs métalliques (Pham, 2007). Réellement, la structure sera soumise aux conditions climatiques extérieures, et donc à des variations thermo-hydriques. Du fait des propriétés hygroscopiques du bois qui impliquent une dilatation importante de celui-ci, l'utilisation d'une colle plus souple, supportant les déformations du bois peut être une meilleure solution. Il s'agit alors de trouver un compromis entre tenue mécanique et durabilité de l'assemblage.

Un autre point important est que l'adhésif présente des propriétés qui évoluent dans le temps en fonction des conditions mécaniques et climatiques auxquelles il est soumis. Il s'agit là aussi d'un critère à prendre en compte dans le choix de la colle.

Tableau 1-5 : Caractéristiques des résines structurales.

*NP = non précisé, les valeurs indiquées sont données à titre indicatif et sont tirées de fiches techniques de colles commercialisées

	Époxy	Polyuréthane		Composé acrylique		
		Mono-composants	Bi-composants	Cyanoacrylates	Anaérobies	Acryliques modifiées
Module d'élasticité (MPa)	2000 à 5000	10 à 1200	10 à 1200	100 à 1500	100 à 1500	100 à 1500
Résistance au cisaillement (MPa)	15 à 40	6 à 15	6 à 15	15 à 25	4 à 20	20 à 30
Résistance à la traction (MPa)	70 à 80	1 à 3	5 à 13	10 à 25	10 à 15	10 à 15
Allongement à rupture (%)	0,1 à 1,5	200 à 500	15 à 300	NP	NP	150
Résistance à la compression (MPa)	140 à 150	NP*	NP*	NP*	15 à 35	NP*

1.2.3.3 Propriétés de vieillissement d'une résine structurale

La littérature consacrée à la durabilité des résines est abondante du fait de leur utilisation courante dans le domaine industriel. Les effets de la température, de l'humidité mais aussi de sollicitations mécaniques sur la tenue des résines, plus généralement de résines époxy, ont été étudiés (Bruneaux, 2004 ; Sadi, 1990 ; Benzarti, Pastor, Chaussadent, & Thaveau, 2003).

a) Effets de la température

Le vieillissement physique correspond à l'évolution des chaînes macromoléculaires initialement dans un état hors équilibre. Celles-ci vont se réorganiser pour se rapprocher de l'état d'équilibre. Précisément, on caractérise une résine par sa température de transition vitreuse. On définit la « température de transition vitreuse » (Tg), comme étant la température à laquelle la résine passe d'un état rigide à un état caoutchouteux. Ce phénomène est directement lié à la structure moléculaire du polymère pour lequel, au-dessus de la température Tg, des liaisons intermoléculaires s'affaiblissent, formant un matériau présentant une grande souplesse. Ce changement d'état s'accompagne de variations importantes des propriétés mécaniques de la résine, notamment une chute importante des modules d'élasticité. Ainsi une résine qui

polymérise à une température inférieure à la température T_g , donc à une température pour laquelle la mobilité moléculaire est trop faible, fige dans un état hors équilibre.

Le vieillissement physique est alors fortement lié aux conditions de température auxquelles sera soumis le polymère. Concernant le vieillissement physique d'une résine, on peut citer les travaux de Barral (Barral, Cano, & Lopez, 1999), Hutchinson (Hutchinson, 1995) et Bush (Bush, 2000) qui portent sur la compréhension des phénomènes de dégradation. Il a par ailleurs été montré que la dégradation thermique des résines existe lorsqu'elles sont soumises à des températures proches de la « température de transition vitreuse » (T_g). Celles-ci tendent d'autant plus facilement vers l'état d'équilibre que les liaisons intermoléculaires sont faibles. Dans des conditions de température très inférieures à la température T_g (plus de 50°C inférieures), les dégradations sont négligeables.

Le vieillissement a pour effet de modifier les propriétés mécaniques de la résine. On observe alors les modifications suivantes (Hutchinson, 1995) :

- en cisaillement comme en traction, les modules de conservation³ augmentent ;
- en fluage, la réponse du matériau polymère est décalée vers les temps longs ;
- en flexion, les résistances en flexion et en traction diminuent avec le temps pendant lequel la résine est soumise à la température de vieillissement.

Le seuil de plasticité augmente avec le temps, de même que l'amplitude.

b) Effets de l'humidité

La pénétration de l'eau dans une résine est liée à l'absorption de l'eau dans ses pores nanoscopiques sous forme d'eau libre, mais aussi à la liaison entre les molécules d'eau et la matrice polymérique via des ponts hydrogènes sous forme d'eau liée (Bruneaux, 2004). La pénétration de l'eau dans une résine induit le vieillissement humide, qui peut avoir un effet dans la matrice polymérique mais aussi au niveau de l'interface substrat/adhésif.

Plusieurs phénomènes caractérisent le vieillissement humide :

- Au sein de la matrice polymérique, il a été constaté une plastification de la résine induite par le fait que l'eau liée sur les sites hydrophiles rompt des liaisons intramoléculaires et permet d'augmenter la mobilité des chaînes. Ceci se traduit aussi par une diminution de la température T_g (Zhou & Lucas, 1999). Cette plastification s'accompagne d'une diminution des propriétés mécaniques notamment de la résistance et du module d'élasticité (Nogueira, Ramirez, & Torres, 2001). Un gonflement de la matrice polymérique est également observé. Précisément pour le cas d'une résine époxy, il a été montré une plastification de la résine après vieillissement en milieu humide (95 % d'humidité relative à 40°C) accompagnée d'une diminution de sa rigidité et de sa capacité et d'une augmentation de sa ductilité (Figure 1-24).

³ En dynamique, on utilise des nombres complexes pour tenir compte de la viscosité et de l'élasticité du matériau. Le module complexe s'écrit alors $G^* = G' + iG''$ où G' , la partie réelle du module de cisaillement est le module de conservation qui caractérise la rigidité du matériau et G'' , la partie imaginaire est le module de perte qui détermine le comportement visqueux du matériau.

- Une dégradation du réseau par réaction d'hydrolyse peut aussi être observée. Lorsqu'un collage avec une colle époxy est réalisé sur un substrat en béton, les zones interfaciales peuvent se retrouver dans un milieu alcalin propice aux réactions d'hydrolyse.

Par ailleurs, dans le cas d'un assemblage collé, l'eau peut pénétrer dans l'adhésif par les faces latérales du joint, à travers le substrat selon les propriétés hydrophiles de celui-ci, mais peut aussi diffuser à l'interface entre le polymère et le substrat. Aussi selon le mode de diffusion, le gonflement différentiel induit de la résine va générer des contraintes mécaniques supplémentaires. Ceci et la diminution des propriétés mécaniques de la résine induisent une baisse des propriétés globales de l'assemblage.

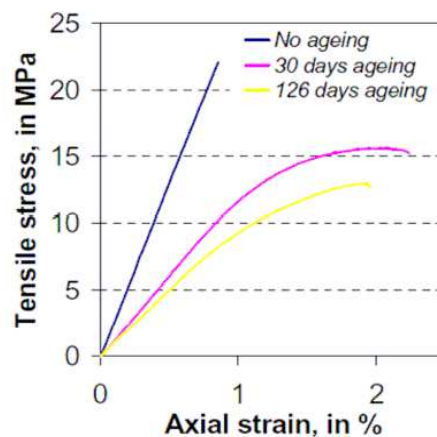


Figure 1-24 : Contraintes de traction moyennes en fonction des déformations sur des éprouvettes de colles époxy non vieilles et vieilles en milieu humide à HR=95 % et T= 40°C (Chataigner, Rabasse, Benzarti, Quiertant, & Aubnac, 2010).

c) Effets de sollicitations mécaniques

Du fait de leur structure moléculaire, les résines présentent un comportement viscoélastique qui dépend du temps d'application de la contrainte.

Sous charge constante (respectivement à déformation constante), le phénomène de fluage (de relaxation) se produit par glissement des chaînes moléculaires les unes par rapport aux autres. Cette réorganisation des chaînes est en lien avec les variations des propriétés mécaniques du joint. L'aptitude au fluage dépend de la densité de réticulation de réseau.

Le joint de colle peut aussi être soumis à des sollicitations cycliques. Ces sollicitations peuvent être produites par exemple par le passage de voitures sur un pont, ou dans le cas d'un assemblage bois-béton collé, par le phénomène de retrait-gonflement empêché du bois soumis à des conditions climatiques cycliques. Dans ce cas, l'adhésif se dégrade par fatigue, même si la charge supportée à chaque cycle est inférieure au seuil de tolérance. En effet, chacun des chargements va induire des dégradations microscopiques qui vont se propager et endommager le matériau.

La tenue dans le temps d'un assemblage collé doit passer impérativement par l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques de la résine, mais aussi par l'étude du comportement mécanique du joint de colle au sein d'un assemblage collé, notamment les propriétés adhésives de la résine avec les substrats.

1.3 Le collage en génie civil

Connaître les propriétés de l'adhésif utilisé pour assembler les deux substrats est important mais ne suffit pas. Une étape primordiale de l'étude consiste d'une part à tester mécaniquement les assemblages collés au niveau du joint de colle afin d'avoir accès à leur comportement en situation réelle, et d'autre part à étudier la sensibilité de l'ensemble face aux variations de température et d'humidité de l'air.

1.3.1 Étude du comportement mécanique d'un assemblage collé

L'étude expérimentale, via des tests mécaniques, permet de déterminer le point faible d'un assemblage. Plusieurs types de rupture peuvent apparaître (Figure 1-25). Soit l'adhésion est suffisante, et la rupture a lieu dans le substrat ou dans l'adhésif (rupture cohésive), soit le point faible est l'adhésion, et la rupture a lieu à l'interface (rupture adhésive).

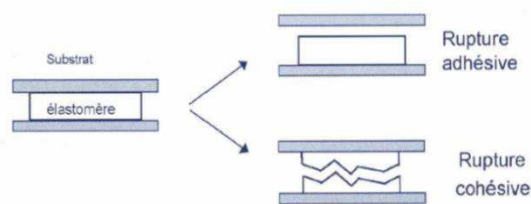


Figure 1-25 : Schématisation des types de rupture après essais mécaniques (Chataigner S. , 2008).

1.3.1.1 Essais mécaniques

Les essais mécaniques utilisés pour caractériser le comportement des assemblages collés doivent être représentatifs de ce qui se passe au sein d'une structure pendant son service. De nombreux tests mécaniques existent et on distingue trois principaux modes de sollicitation du joint : la sollicitation normale, le pelage et le cisaillement (Figure 1-26).

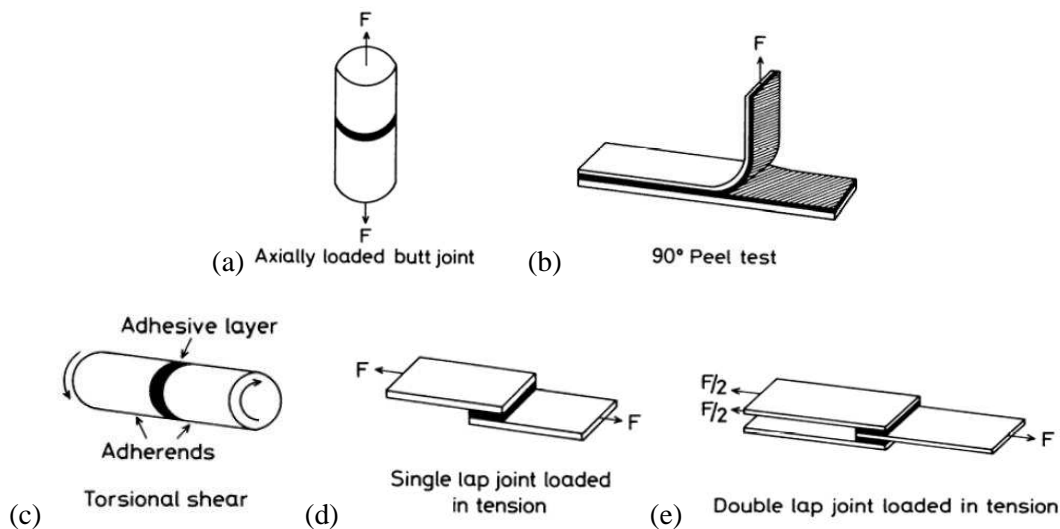


Figure 1-26 : Les principaux modes de sollicitation, de gauche à droite : (a) traction bout-à-bout ; (b) pelage ; (c) torsion-cisaillement ; (d) cisaillement direct à simple recouvrement ; (e) cisaillement direct à double recouvrement (Adams, Comyn, & Waka, 1984).

Les essais mécaniques utilisés pour caractériser le comportement d'un assemblage collé sont listés dans [Chataigner, 2008].

Dans le cas d'une structure mixte collée, le joint est sollicité principalement en cisaillement. Nous allons donc par la suite nous pencher essentiellement sur les essais mécaniques de cisaillement, notamment les tests les plus utilisés, l'intérêt de ce paragraphe étant d'avoir une vue globale des travaux existants concernant les essais de cisaillement appliqués dans le cas d'assemblages collés en général.

a) Essais de cisaillement par torsion

L'essai de cisaillement par torsion, également appelé le « napkin-ring test » est largement utilisé dans de nombreux domaines d'ingénierie. L'essai a pour principe de solliciter en torsion deux cylindres collés bout à bout de manière à générer du cisaillement (NF EN 14869-1, ISO 11003-1). Pour que le cisaillement soit constant dans le joint de colle, les cylindres doivent être de fine épaisseur.

b) L'essai “Thick Adherend Shear Test” (TAST)

Un autre essai de cisaillement très utilisé est l'essai TAST (essai de traction sur éprouvette épaisse) (ISO 11003-2). L'essai consiste à tester en cisaillement des joints à simple recouvrement sur des substrats épais et très rigides, et ayant une faible longueur de recouvrement (Figure 1-27a). La mise en œuvre est facile et se fait à partir d'une machine de traction, mais il a été montré que l'analyse des résultats est fortement influencée par la présence d'effets de bords (Cognard, Créac'hacdec, Sohier, & Davies, 2008). Pour limiter ces effets de bords, des becs ont été usinés dans les substrats proches de l'interface, ce qui rend la réalisation des échantillons plus longue.

c) L'essai ARCAN

Le dispositif de l'essai ARCAN est représenté sur la figure 1-27b. Il permet de réaliser un état de sollicitation biaxiale, de combiner les composantes de traction ou compression aux composantes de cisaillement, donc d'étudier l'influence de l'ajout d'une composante hors plan sur le fonctionnement du joint (Cognard J. , 2006).

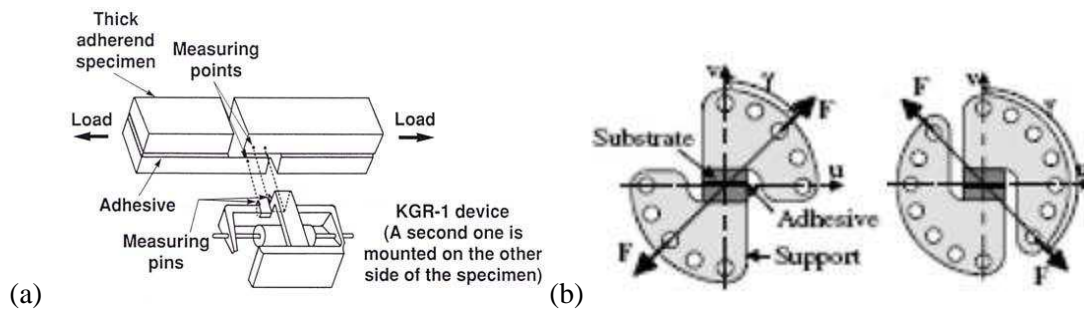


Figure 1-27 : Dispositif des essais (a) TAST (Kassapoglou & Adelman, 1991) (b) et ARCAN (Cognard J. , 2006).

Les tests présentés ci-dessus sont très étendus notamment sur des substrats métalliques, aluminiums et composites. Ils présentent les inconvénients de nécessiter une instrumentation spécifique et la fabrication d'éprouvettes particulières.

La présente étude traite en particulier des assemblages collés bois-béton, nous nous intéressons plus particulièrement aux tests de cisaillement appliqués sur des substrats bois ou béton. En l'occurrence, la bibliographie est large et concerne soit des assemblages béton-béton, béton-composites, ou bois-bois. Dans ces cas, on retrouve principalement les essais de cisaillement à simple et double recouvrement que nous présentons ci-dessous.

d) Essais de cisaillement simple et double recouvrement

Dans les cas particuliers de substrats en béton ou en bois, ce sont plutôt les tests de cisaillement simple et double recouvrement qui sont utilisés car ils permettent d'étudier l'assemblage à une plus grande échelle et ne requièrent pas de dispositifs particuliers.

- Les joints à simple recouvrement sont très fréquemment étudiés, notamment avec des substrats béton en raison de leur simplicité de mise en œuvre (NF-EN 1465, ISO 4587). L'essai existe sous deux variantes : traction-cisaillement ou compression-cisaillement où la sollicitation est inversée (Figure 1-28).

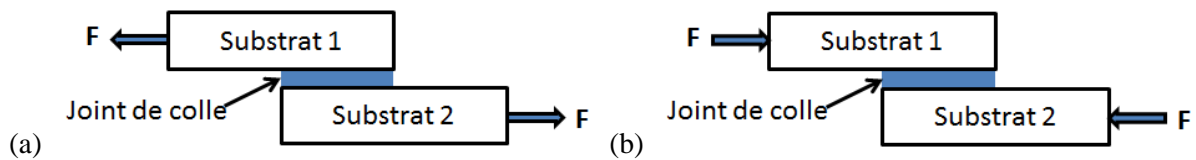


Figure 1-28: Dispositif des essais de cisaillement à simple recouvrement : (a) traction-cisaillement (b) compression-cisaillement.

Concernant les tests de cisaillement sur bois lamellé-collé, la norme NF EN 392 (Bois lamellé-collé : essais de cisaillement des joints de collage) propose une variante de l'essai à simple recouvrement, en compression cisaillement.

On peut citer aussi les travaux de Schäfers et al (Schäfers & Seim, 2010) dans lesquels il effectue un test de cisaillement compression à simple recouvrement sur un assemblage bois-BFUP collé via une résine époxy ;

- L'essai de cisaillement à double recouvrement est basé sur le même principe que celui à simple recouvrement mais l'échantillon testé est composé de deux joints de colle chargés simultanément. Il est utilisé car il réduit l'excentricité du chargement par rapport à l'essai à simple recouvrement et donc l'effort de flexion.

Cet essai est l'essai standard utilisé pour les assemblages collés acier-béton sous forme d'essais Push-Out (Johnson & Anderson, 1993 ; Jurkiewieza & Hottierb, 2005 ; Carputi, Noto, & Russo-Ermolli, 1981).

En plus du cas d'assemblages collés à substrat béton ou bois, l'essai de cisaillement à double recouvrement est utilisé dans les cas d'assemblages bois-béton usuels, c'est-à-dire assemblés grâce à des connecteurs métalliques.

On peut citer de nombreux travaux dont ceux de Branco et al qui comparent différents tests de cisaillement simple et double recouvrement proposés dans l'Eurocode 5 (Branco, Cruz Paulo, & Piazza, 2009) appliqués aux assemblages mixtes bois-béton connectés par des connecteurs métalliques.

On peut citer aussi les travaux de Lukaszewska, Johnsson et Fragiacommo (Lukaszewska, Johnsson, & Fragiacommo, 2008) dans lesquels les auteurs testent les performances en cisaillement compression à simple recouvrement de corps d'épreuve bois-béton pour l'utilisation de planchers mixtes préfabriqués bois-béton (Figure 1-29). Plusieurs types de connecteurs discontinus ou continus sont testés ainsi qu'un cas avec collage de connexion dite par « adhérence des substrats », où les grilles de métal sont collées via une résine époxy aux substrats bois et béton afin de renforcer l'adhérence acier-substrat.

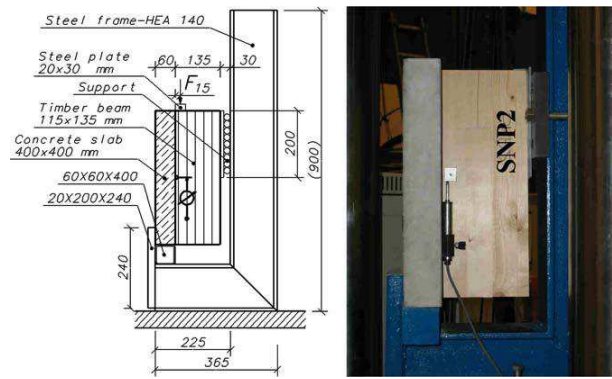


Figure 1-29 : Essai de cisaillement compression de joint à simple recouvrement (Lukaszewska, Johnsson, & Fragiaco, 2008).

Carvalho et Mantilla Carrasco (Carvalho & Mantilla Carrasco, 2010) ont testé des assemblages bois-béton en cisaillement à double recouvrement (l'essai Push-Out) où les connecteurs en question sont collés via une résine époxy aux substrats bois et béton (Figure 2-30). L'objet de leur étude est de comparer les deux cas dans lesquels l'élément central de l'échantillon est soit le bois, soit le béton.



Figure 1-30 : Éprouvettes Push-Out testées dans Carvalho et al. (Carvalho & Mantilla Carrasco, 2010).

Les résultats de cette étude ont montré l'influence de l'arrangement des éprouvettes dans la résistance en cisaillement de l'éprouvette. Une moins bonne résistance a par ailleurs été montrée dans les cas où l'élément central est le béton et est expliquée entre autres par la concentration de contraintes et l'apparition de fissures au niveau des connecteurs dans le béton (plus nombreux dans ce cas que dans le cas où l'élément central est le bois).

Dans le cas d'un assemblage collé bois-béton sans connecteur métallique, et lorsque la résine utilisée présente une rigidité importante (cas de l'époxy), les contraintes sont concentrées au niveau des bords de joints. Dans cette situation, utiliser le béton comme élément central apparaît plus approprié étant donné les propriétés mécaniques du béton comparées à celles du bois.

Il faut noter que ce type d'essai sert surtout à étudier le fonctionnement du joint collé et non à caractériser l'adhésif. Cet aspect est approfondi dans le chapitre 3, pour l'essai compression-cisaillement à double recouvrement (essai Push-Out).

1.3.2 Études de la durabilité d'assemblages collés

L'étude de la durabilité d'un assemblage passe dans un premier temps par l'étude de l'évolution des propriétés des matériaux constitutifs, notamment de l'adhésif dans le cas d'un assemblage collé. Ainsi, nous avons vu dans le paragraphe 1.2 que la variation de teneur en eau peut induire des dommages sur les différents matériaux constituant la structure c'est-à-dire le béton, le bois mais aussi l'adhésif. Précisément, les adhésifs sont très sensibles aux conditions environnementales et leurs propriétés sont altérées lorsqu'ils sont soumis à des chargements hydriques ; ce mécanisme est irréversible, ce qui va avoir un effet important quant à la durabilité des assemblages collés. Cet aspect doit être complété par l'étude de l'évolution des propriétés d'adhérence de l'adhésif avec les substrats constituant l'assemblage. Ce paragraphe présentera dans un premier temps une étude bibliographique concernant le vieillissement d'assemblages collés à substrats béton ou bois, puis dans un deuxième temps des travaux sur le vieillissement d'assemblages bois-béton usuels.

1.3.2.1 Vieillissement d'assemblages collés : étude des propriétés d'adhérence

La pénétration d'eau dans un assemblage collé au cours de vieillissements hydriques induit en plus du vieillissement de l'adhésif, un endommagement localisé au niveau de l'interface entre le substrat et l'adhésif, ce qui modifie le comportement mécanique de l'assemblage.

La plupart des travaux disponibles dans la littérature sont consacrés essentiellement à la durabilité d'ouvrages d'art en béton renforcés par collage de matériaux composites (Karbhari & Zao, 1998 ; Frigione, Aiello, & Naddeo, 2006 ; Mario, 2007 ; Popineau, 2005). Dans leurs travaux, des échantillons sont immergés dans de l'eau distillée pendant plusieurs semaines pour accélérer le vieillissement. Il a été constaté une chute de résistance allant de 15 à 35 % selon l'adhésif utilisé et le temps d'immersion dans l'eau distillée (allant de 1 à 3 mois selon les travaux). Pour accélérer le vieillissement, Chajes et al (Chajes, Thomson, & Farschman, 1995) ont réalisé des cycles d'humidification/séchage sur des poutres en béton renforcées par de la fibre de carbone, d'aramide ou de verre collé au moyen d'une résine époxy. Les poutres ont été testées en flexion 4 points. Ces essais ont montré une baisse de résistance allant de 20 à 35 % environ après vieillissement avec un mode de rupture qui deviendrait adhésif à l'interface, ce qui montre une dégradation des propriétés d'adhérence de l'adhésif.

Concernant la durabilité d'assemblages collés à substrats bois, le contrôle de la tenue des plans de collage (notamment pour le bois lamellé-collé) se fait généralement par des essais de délamination selon la norme NF EN 391 (Bois lamellé-collé - Essai de délamination des joints de collage). La norme préconise de soumettre le bois à des conditions hydriques (immersion dans l'eau) et de pression sévères avec des cycles, et de contrôler la longueur de décollement des lamelles après chargement. Dans les travaux de Raftery et al (Raftery, Harte, & Rodd, 2009) les auteurs ont testé en cisaillement traction simple recouvrement des échantillons de bois collés renforcés par des composites polymères à fibres de verre (FRP), non vieillis et vieillis selon la norme NF EN 391. Trois résines époxy ont été testées. Les résultats ont montré que le collage bois-FRP peut être très durable selon la résine époxy utilisée. De plus, il est possible de garder de très bonnes performances en cisaillement même après vieillissement. Celles-ci dépendent du substrat FRP utilisé, de la qualité de la liaison époxy, et de la préparation des surfaces

(notamment l'application d'un primaire sur les substrats avant le collage va favoriser le mouillage et la pénétration de la résine dans les substrats, et ainsi renforcer l'adhérence).

Ce paragraphe met en évidence l'influence de chargements hydriques sur la résistance mécanique d'assemblages collés. La pénétration de l'eau dans l'assemblage collé induit une chute des propriétés qui est associée au phénomène de plastification de l'adhésif, mais aussi une dégradation de l'interface adhésif/substrat lorsque la prise d'eau dans le joint devient trop importante.

1.3.2.2 Vieillessement d'assemblages bois-béton usuels

S'il n'existe pas aujourd'hui d'étude traitant spécifiquement de la durabilité d'assemblages collés bois-béton, on trouve dans la littérature des travaux traitant du vieillissement hydrique d'assemblages bois-béton traditionnels, donc lorsque les deux matériaux bois et béton sont reliés par des connecteurs métalliques.

On peut retrouver quelques études expérimentales du comportement à long terme d'assemblages bois-béton (Ceccotti, Massimo, & Giordano, 2006 ; Capretti & Ceccotti, 1996 ; Fragiocome, Amadio, & Macorini, 2007).

Dans Ceccotti et al (Ceccotti, Fellow, Fragiacom, & Giordano, 2006), une poutre bois-béton a été testée à long terme après avoir été stockée pendant 5 ans en environnement extérieur sous une charge uniforme de 4 kN/m appliquée à l'aide de poutres de béton préfabriquées posées sur le corps d'épreuve (Figure 1-31). Après vieillissement, la poutre a été testée en flexion 4 points et deux échantillons ont été découpés en bout de poutre pour être testés en cisaillement compression simple recouvrement. Les résultats ont été comparés aux effets différés prévus par l'Eurocode 5 et ont montré que les résistances obtenues expérimentalement après vieillissement sont largement supérieures à celles estimées par les calculs proposés par la norme.

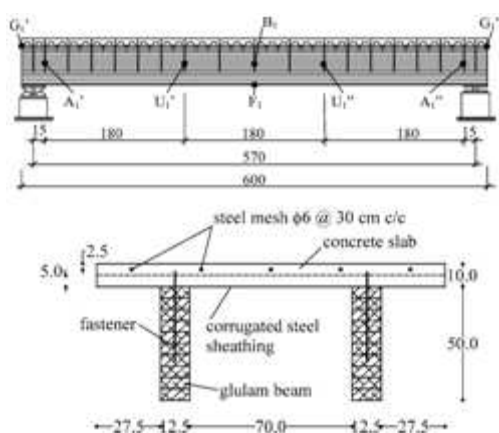


Figure 1-31 : Corps d'épreuve testé pendant l'essai à long terme (Ceccotti, Massimo, & Giordano, 2006).

La difficulté à estimer le comportement différé d'un assemblage bois-béton sous conditions climatiques variables réside dans le fait que le comportement hydromécanique de chacun des matériaux constituant l'assemblage est différent, ce qui induit constamment des modifications de l'état d'équilibre de la structure

lorsque celle-ci est soumise à des conditions climatiques variables. Ces études ont été confrontées à des simulations numériques pour estimer le comportement à long terme de ces assemblages (Bou Said, 2003 ; Fragiaco & Ceccotti, 2006).

1.3.3 Conclusion

Dans l'étude qui précède, nous avons choisi de nous intéresser aux essais de cisaillement étant donné l'état de service d'une structure mixte. Il existe une variété importante d'essais de cisaillement, chacun s'appliquant à un type d'assemblage donné. Dans le cas d'un assemblage mixte bois-béton, utilisé dans le bâtiment ou de manière plus spécifique dans le domaine des ouvrages d'art, il est préférable de travailler à une échelle plus représentative de la structure *in situ*. Nous avons donc pris soin de bien détailler deux types d'essais de cisaillement : les tests de cisaillement à simple et à double recouvrement. En effet dans le cas de collage de substrats bois ou béton, ce sont les tests que l'on retrouve le plus souvent dans la littérature. Nous avons vu aussi que ces essais sont très utilisés pour les solutions mixtes bois-béton à connecteurs métalliques et que l'étude de la durabilité de tels assemblages soumis aux contraintes climatiques est aussi abordée.

En revanche, les travaux portant sur l'étude de la durabilité d'assemblages collés concernent essentiellement le vieillissement sous humidité d'adhésifs structuraux seuls et d'assemblages déjà très utilisés dans le milieu du génie civil : les ouvrages d'art en béton renforcés par des matériaux composites. On retrouve aussi quelques travaux sur le vieillissement d'assemblages bois pour l'utilisation de bois lamellé-collé avec des conditions de vieillissement normalisées qui sont extrêmement sévères comparées aux conditions climatiques réelles auxquelles le bois sera soumis pendant son service.

1.4 Conclusion, stratégie de la recherche

La mixité bois-béton est un concept déjà développé et utilisé dans les structures (les ouvrages d'art et les planchers). L'étude de la durabilité de tels assemblages est déjà bien abordée dans la littérature notamment dans le cas de connecteurs métalliques. Si la technique du collage est prometteuse pour des matériaux tels que l'acier ou les composites, ce n'est pas le cas pour le bois qui présente des propriétés thermo-hydro-mécaniques différentes.

Nous avons développé dans ce chapitre les différentes investigations menées autour de l'étude de la durabilité de structures mixtes bois-béton. Ceci a permis de mettre en place trois aspects essentiels à l'étude de la tenue à long terme d'un assemblage mixte :

- (1) la connaissance des comportements à court terme et à long terme des différents matériaux constituant l'assemblage, donc le bois, le béton et la résine dans notre cas, nécessaire à la compréhension du comportement d'un assemblage collé bois-béton ;
- (2) l'étude du comportement mécanique et en particulier le comportement au cisaillement des assemblages mixtes afin d'obtenir des informations sur les propriétés d'adhérence ;
- (3) l'étude de l'influence des conditions climatiques sur le comportement à long terme de structures mixtes bois-béton.

Ce sont sur ces points importants que reposent les travaux menés pendant la thèse.

Objectif et organisation de la thèse

De nombreux paramètres peuvent influencer la tenue à long terme d'un assemblage collé bois-béton tels que les chargements mécaniques et les variations climatiques (température et humidité relative) auxquels est soumise la structure pendant sa durée de vie. Assurer la durabilité de l'assemblage se fait donc en plusieurs étapes. La bonne tenue mécanique de l'assemblage en tant qu'élément de structure pour un ouvrage d'art a d'abord été montrée (Pham, 2007). Il est nécessaire, aujourd'hui, d'assurer la durabilité de la structure soumise aux variations climatiques.

Ne disposant pas de suffisamment de temps pour prévoir la tenue d'une structure soumise aux intempéries, il est nécessaire de développer des méthodologies et techniques permettant d'observer et d'identifier les paramètres qui pourraient altérer la durabilité d'une structure mixte.

La problématique de la thèse est donc d'étudier l'influence de chargements hydriques sur la tenue d'un assemblage collé bois-béton en déterminant les paramètres qui gouvernent les mécanismes d'endommagement de l'assemblage.

La thèse s'organise en quatre grands objectifs, chacun faisant l'objet d'un chapitre :

- (1) L'identification des propriétés mécaniques et hydriques des matériaux bois, bétons et adhésifs utilisés dans les différents essais.
- (2) L'évaluation des propriétés d'adhérence de la colle sur les substrats bois et béton. Elle se fera par des essais de cisaillement sur des assemblages collés bois-béton. Aussi on tentera d'évaluer l'effet de l'humidité sur ces propriétés d'adhérence.
- (3) L'étude du comportement de l'assemblage collé sous chargement hydrique variable. En effet, des variations hydriques peuvent altérer les propriétés d'adhérence de la colle mais aussi induire des dommages sur le bois et le béton notamment en raison des propriétés différenciées entre ces deux matériaux. L'idée est d'identifier les effets de l'humidité sur l'endommagement de l'adhésif (connexion), du bois et du béton dans la structure.
- (4) L'utilisation et la validation d'un modèle numérique par éléments finis pour optimiser ce type de connexion et définir des conditions de mise en œuvre et d'utilisation de ces assemblages.

Moyens utilisés pour atteindre les objectifs

La thèse est principalement expérimentale, et se divise en deux principales séries d'essais :

- les essais Push-out. Ces essais de cisaillement ont été mis en place pour des assemblages collés bois-béton au Laboratoire Départemental d'Autun ;
- les essais de chargement hydrique sur des assemblages collés bois-béton. Ces essais consistent à soumettre un assemblage bois-béton collé à une humidité ambiante élevée et d'évaluer l'effet du chargement hydrique sur le comportement de l'échantillon. Ils ont été développés et validés au Laboratoire Navier.

L'objet de ces essais est d'obtenir des informations sur les mécanismes d'endommagement de ces assemblages. Pour cela, nous disposons de la technique de corrélation d'images numériques 2D dont

l'intérêt est d'acquérir des cartes de déformations locales, ce qui présente l'avantage de pouvoir définir des zones et des échéances d'endommagement précises. Entre autres, une part importante des travaux consiste à valider l'utilisation de la technique de corrélation d'images pour les essais de chargement hydrique.

De plus, nous pouvons nous appuyer sur les cartes de déformations expérimentales obtenues par cette technique pour valider les calculs en les confrontant aux résultats numériques. Une bonne approximation entre les travaux expérimentaux et numériques va permettre une bonne évaluation des contraintes induites au sein de l'assemblage par les chargements hydriques. Ainsi, on peut optimiser la connexion et définir des conditions d'utilisation des structures mixtes bois-béton.

2 Matériaux et méthodes expérimentales

Ce chapitre met en place les travaux effectués au cours de la thèse. Il se divise en trois parties.

Il présente, dans une première partie, les caractéristiques et les propriétés mécaniques et hydriques des matériaux utilisés : les bois, les bétons et les colles. Ces données sont essentielles dans la compréhension du comportement de l'assemblage et vont être intégrées notamment dans des simulations numériques au chapitre 5.

Une deuxième partie décrit les essais mis en place pour analyser les effets différés induits au niveau de l'assemblage bois-béton lors d'une humidification. Ainsi l'analyse se fera à travers des essais mécaniques notamment de cisaillement pour tester l'adhérence des colles sur les matériaux bois et béton dont les résultats seront présentés au chapitre 3, ainsi que des essais de vieillissement d'assemblages bois-béton présentés au chapitre 4.

Ces essais seront notamment exploités par la technique de corrélation d'images numériques (DIC-2D) qui permettra l'acquisition de cartes de déformations et donc l'analyse fine du comportement d'assemblages collés en particulier au niveau de l'interface collée. Les principes de base de cette technique d'imagerie sont détaillés dans la troisième partie de ce chapitre.

2.1 Propriétés des matériaux

2.1.1 Les bois

Deux espèces de bois ont été utilisées durant ces travaux de thèse : l'épicéa et le douglas. Il s'agit de deux résineux très utilisés en France dans le domaine de la construction. On les retrouve dans la fabrication de charpentes, d'ossatures bois, de bardages, et de planchers (notamment pour le douglas). Les deux bois se distinguent d'une part par leurs propriétés mécaniques et leurs propriétés hygroscopiques, et d'autre part par leur structure (taille de cernes, distinction des cernes d'été et de printemps, etc.).

Les échantillons sont prélevés dans des poutres de bois lamellé-collé (qui sont utilisées pour fabriquer les structures mixtes bois-béton collées) dont les plans de collage sont parallèles à la direction longitudinale du bois (Figure 2-1).

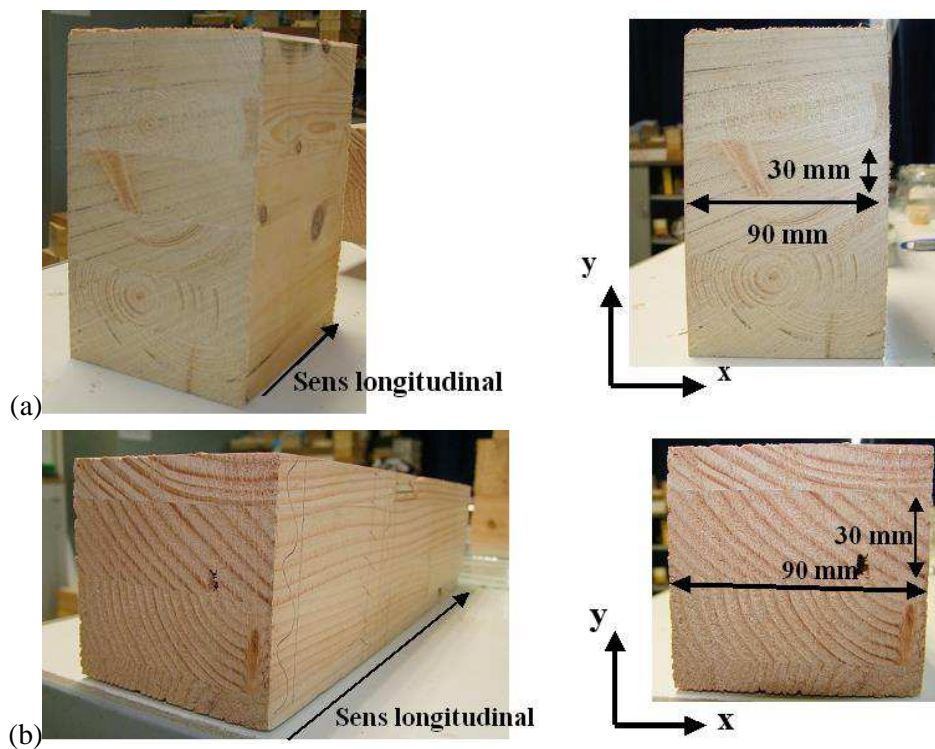


Figure 2-1 : Photos du bois lamellé-collé d'épicéa (a) et de douglas (b).

2.1.1.1 Propriétés mécaniques du bois

a) Propriétés mécaniques du lamellé-collé

Pour les résistances en compression, en traction et en cisaillement des bois, on se référera aux fiches techniques et à la norme NF P 21-400 qui définit les propriétés minimales des bois en fonction de leur classement visuel. Ces valeurs sont précisées dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Propriétés mécaniques des bois étudiés (épicéa et douglas) données par la norme NF P 21-400 pour les lamellés-collés.

Désignation	Épicéa	Douglas
	GL24	GL24-homogène
Contrainte de compression longitudinale (MPa)	24	24
Contrainte de compression perpendiculaire (MPa)	2,7	2,7
Contrainte de traction longitudinale (MPa)	16,4	16,4
Contrainte de traction perpendiculaire (MPa)	0,4	0,4
Contrainte de flexion (MPa)	24	24
Contrainte de cisaillement (MPa)	2,7	2,7
Module longitudinal (GPa)	11,6	11,6
Module de cisaillement (GPa)	0,75	0,75
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	380	380

b) Modules d'élasticité de l'épicéa et du douglas (bois massif)

Les modules longitudinaux et de cisaillement sont donnés dans le cas du bois lamellé-collé par la norme NF P 21-400, en fonction de son classement. Ces valeurs sont généralisées et données pour toutes les essences de bois résineux ou feuillus, mais ne suffisent pas car les caractéristiques mécaniques du bois dépendent de l'essence, de sa densité, et de sa teneur en eau. De plus, comme nous l'avons précisé dans le chapitre 1 (&1.3.1), les propriétés élastiques du bois massif sont définies par neuf paramètres en raison de son anisotropie dans le repère (r, t, l) :

- E_R, E_T , et E_L sont les modules d'Young selon les trois axes R, T et L ;
- G_{RL}, G_{TL} , et G_{RT} sont les modules de cisaillement selon les trois plans RL, TL et RT ;
- μ_{RL}, μ_{TL} , et μ_{RT} sont les coefficients de poisson.

Le tableau 2-2 présente les caractéristiques élastiques de l'épicéa et du douglas massifs à 12 % de teneur en eau données par le *Wood Handbook (United States Department of Agriculture, 1999)*.

Tableau 2-2 : Densités et paramètres d'élasticité de l'épicéa et du douglas pour une teneur en eau $h=12$ %
(*Wood HandBook, 1999*).

	Épicéa, $d=0,36$	Douglas, $d=0,48$
E_R (MPa)	772	857
E_T (MPa)	425	630
E_L (MPa)	9900	12600
G_{RL} (MPa)	633	806
G_{TL} (MPa)	604	983
G_{RT} (MPa)	30	88
μ_{RL}	0,04	0,04
μ_{TL}	0,03	0,03
μ_{RT}	0,44	0,39

Selon la bibliographie réalisée (§ 1.2.1.4.), à l'échelle microscopique (échelle des cernes), les propriétés mécaniques dans le bois dépendent du positionnement par rapport au cœur du bois, cependant à l'échelle où nous travaillons, nous ne considérerons pas ce phénomène. En revanche, ces modules varient en fonction de la teneur en eau. Cette variation peut être prise en compte. On rappelle que l'on peut estimer les valeurs des modules élastiques dans la plage de teneur en eau h comprise entre 6 et 20 % selon une interpolation linéaire (équation 1-5) (Guitard, 1985).

La dépendance linéaire des propriétés élastiques en fonction de la teneur en eau et l'ordre de grandeur des propriétés élastiques données dans le *Wood Handbook* ont été validés pour les matériaux de cette étude (Care & Foret, 2012).

2.1.1.2 Hygroscopie du bois

a) Courbes de sorption

Nous avons déterminé expérimentalement les courbes de sorption de l'épicéa et du douglas utilisés dans le cadre de la thèse.

Les tests consistent à maintenir un échantillon de bois initialement anhydre de petite dimension (environ 1,5 cm de côté) en ambiance contrôlée en termes d'humidité et de température. Lorsque celui-ci a atteint l'équilibre hygroscopique, on relève la masse et on en déduit sa teneur en eau h pour une humidité relative HR donnée.

Précisément, nous avons préparé quatre échantillons pour chacun des bois (Figure 2-2). Les échantillons sont secs, étuvés selon la norme *NF EN 13183-1* à 103°C jusqu'à stabilisation de la masse.

Nous disposons de quatre dessiccateurs (Figure 2-3) au fond desquels nous avons placé des solutions salines saturées choisies de façon à obtenir les conditions d'équilibre désirées suivantes, obtenues pour une température de 20 °C :

- HR = 33 %, chlorure de magnésium
- HR = 55 %, nitrate de magnésium
- HR = 81 %, sulfate d'ammonium
- HR = 97 %, sulfate de potassium

Ces dessiccateurs sont placés dans une pièce à température contrôlée, constante à 20 °C (± 1 °C).

Les échantillons de bois sont placés dans les dessiccateurs. Lorsque ceux-ci sont à l'équilibre (variation de masse entre deux échéances inférieure à 0,5 %) on relève la masse de l'échantillon, pour en déduire la masse d'eau prise et la teneur en humidité de l'échantillon. Les échantillons sont alors à nouveau stockés dans un autre dessiccateur sous une humidité relative différente. On remarquera que les valeurs mesurées pour l'isotherme de sorption sont en fait des valeurs intermédiaires, c'est-à-dire que les points des courbes de désorption présentées par les figures 2-4 et 2-5 ne sont pas les points qui délimitent la boucle d'hystérésis. En réalité, ils se trouvent dans la boucle. Cependant, étant donné la dispersion importante des résultats induite entre autres par la forte hétérogénéité du matériau bois (les échantillons utilisés au cours de la thèse ne proviennent pas du même tronc, de la même lamelle et quelques défauts non visibles à l'œil peuvent être présents), on pourra se baser sur cette courbe lors des simulations numériques pour déterminer les caractéristiques hygroscopiques des bois utilisés.

Pour chaque étape, la mise à l'équilibre se fait en 15 jours environ.

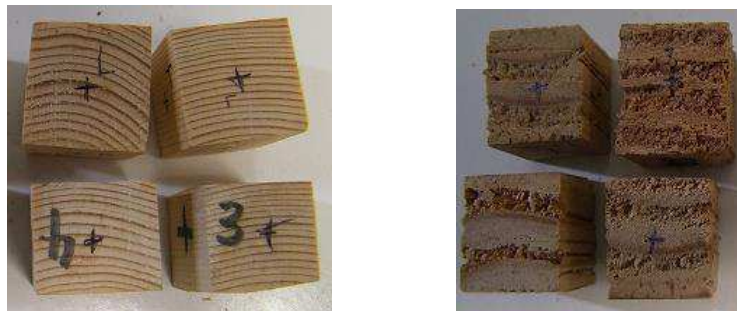


Figure 2-2 : Photos d'éléments de bois testés (épicéa à gauche, douglas à droite).



Figure 2-3 : Stockage des échantillons sous humidité relative de l'air contrôlée par des solutions salines dans des dessiccateurs.

L'essai permet d'obtenir les courbes de sorption des figures 2-4 et 2-5.

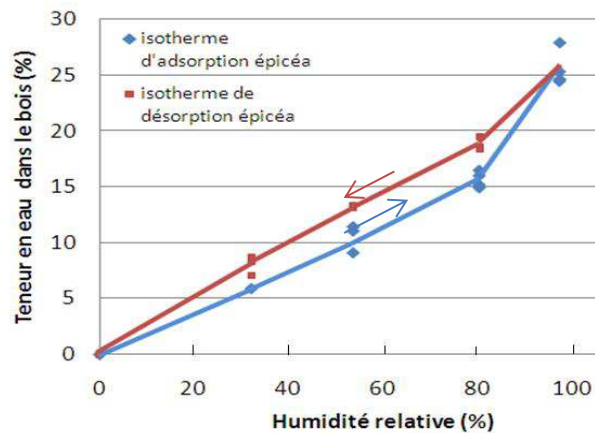


Figure 2-4 : Isotherme de sorption de l'épicéa à T=20 °C (les courbes continues sont des valeurs interpolées à partir des points expérimentaux).

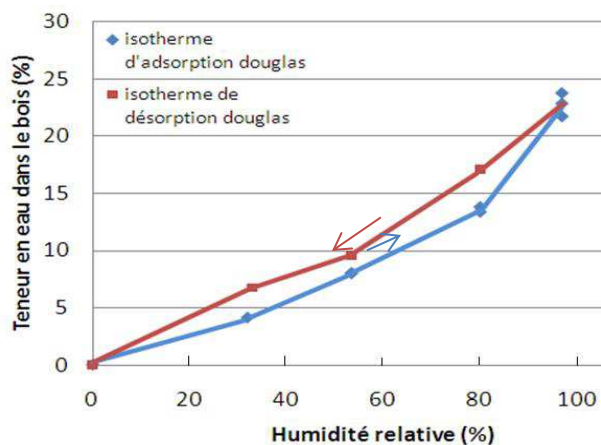


Figure 2-5 : Isothermes de sorption du douglas à T=20 °C (les courbes continues sont des valeurs interpolées à partir des points expérimentaux).

Les isothermes de sorption obtenues expérimentalement sont des données essentielles dans l'analyse du comportement hygroscopique du bois. Dans le cas du calcul des coefficients de diffusion et des simulations numériques, la relation liant l'humidité relative de l'air au taux d'humidité du bois est indispensable. Dans le cadre des travaux présentés dans ce document, nous utilisons le logiciel Abaqus. Ce logiciel permet d'exprimer dans les données des matériaux une relation non linéaire entre les caractéristiques du bois et la variable « humidité relative de l'air » en donnant des valeurs intermédiaires, ce qui revient à considérer une relation linéaire entre les deux composantes dans un intervalle d'humidité relative donné (55 à 80 % et 80 à 97 %). Dans le domaine des humidités relatives considérées dans cette étude (50 % à 97 %), cette approximation est valide en considérant des humidités intermédiaires.

b) Coefficients de diffusion

On définit la diffusivité massique du bois comme étant un paramètre décrivant l'aptitude de l'eau à migrer au sein de ce matériau sous l'influence d'un gradient de concentration de teneur en eau. L'eau migre dans le bois sous forme de vapeur d'eau dans les cellules et d'eau liée dans les parois cellulaires. La loi de Fick est utilisée depuis des années par de nombreux auteurs pour déterminer le coefficient de diffusion. On peut citer parmi ces auteurs, Bramhall (Bramhall, 1995), Chen (Chen, Choong, & Wetzel, 1994), Chong (Chong, 1965) et Skaar (Skaar & Babiak, 1982) qui discutent l'application de la loi pour décrire le phénomène de diffusion de l'eau dans le bois et les gradients à considérer (gradients de concentration, de pression de vapeur d'eau, de potentiel chimique ...).

Le coefficient est évalué via des calculs numériques par comparaison avec les données expérimentales. Aujourd'hui, il existe plusieurs méthodes qui permettent de déterminer le coefficient de diffusion dans le bois. La diffusivité massique peut être mesurée soit en régime permanent, soit en régime transitoire :

- En régime permanent, la mesure de ce paramètre consiste à mesurer l'évolution de la masse d'un échantillon de bois, dont deux faces parallèles sont soumises à une humidité relative différente. On peut citer la technique du vaporimètre, la plus souvent utilisée. Un récipient, dans lequel se trouve une solution saline saturée pour contrôler l'humidité relative est recouvert d'un échantillon de bois. L'ensemble est pesé en continu. En effet, la différence d'humidité relative entre l'intérieur et l'extérieur du verre induit une perte ou un gain de masse d'eau de l'ensemble « récipient+bois ». On peut citer parmi les utilisateurs de cette méthode, Comstock (Comstock, 1963), Wadso (Wadso, 1993), Time (Time, 1998) et Zohoun (Zohoun, Agoua, Degan, & Perre, 2003). L'essai implique de s'assurer que la diffusion de l'eau ne se fait qu'à travers l'épaisseur du bois. Cependant, les variations dimensionnelles de l'échantillon au cours de l'essai vont être importantes, ce qui va nécessiter une mise au point qui peut être coûteuse en termes de temps.
- Le régime transitoire consiste à suivre l'évolution de la teneur en eau dans le temps d'un échantillon de bois, initialement à l'équilibre, avec une certaine humidité relative, soumis brutalement à une autre humidité relative contrôlée, maintenue constante par la suite. Généralement la méthode dite de « pesées successives » ou « gravimétrie » est utilisée. L'expérience consiste à suivre l'évolution de la teneur en eau d'un élément de bois soumis à une humidité relative contrôlée, dont la teneur en eau initiale est connue jusqu'à ce que celui-ci soit à l'équilibre. Pour exemple, on peut citer les travaux de Mouchot (Mouchot, 2002), Agoua et Al (Agoua, Zohoun, & Perré, 2001), et Wadso (Wadso, 1994). L'essai est peu coûteux et relativement facile à mettre en place.

Selon le régime, transitoire ou permanent, dans lequel s'inscrit la méthode expérimentale utilisée, les méthodes analytiques employées pour analyser les données expérimentales vont être différentes. Notons que dans les deux cas, plusieurs méthodes numériques de résolution existent et diffèrent par les conditions initiales et aux limites, imposées en rapport avec l'expérience.

Afin de déterminer les coefficients de diffusion selon les trois directions d'anisotropie du bois, nous avons choisi d'utiliser la technique des « pesées successives ».

Comme vu dans le paragraphe 1.3.1, le coefficient de diffusion est un paramètre qui va varier selon que l'on soit en adsorption ou en désorption. De plus, ce paramètre dépend de la température et de la teneur en eau du bois. On travaillera donc à température constante ($20^{\circ}\text{C} \pm 1$) et dans les plages d'humidités relatives suivantes : [55 % à 81 %] et [81 % à 97 %], de façon à avoir les propriétés de diffusion en adsorption dont nous aurons besoin par la suite pour les simulations numériques (chapitre 5).

Pour distinguer les coefficients de diffusion dans les trois directions R , T , et L , nous avons pris soin de prélever les échantillons loin du cœur du bois et de petite taille (cubes de 1,5 cm de côté) afin que les cernes soient le plus parallèles possible aux faces du cube, ceci permettant ainsi de considérer le repère (R , T , L) du bois comme un repère orthonormé (x , y , z). Le coefficient de diffusion est supposé ne pas dépendre du point considéré (pas de dépendance avec le positionnement par rapport au cœur du bois).

Selon la direction souhaitée de la diffusion de l'eau, des faces sont couvertes d'une épaisseur suffisante de paraffine afin d'empêcher la diffusion de l'eau par celles-ci (Figure 2-6). À noter que la méthode pour empêcher la diffusion de l'eau selon certaines faces a été validée par comparaison avec d'autres techniques (parafilm, peinture).

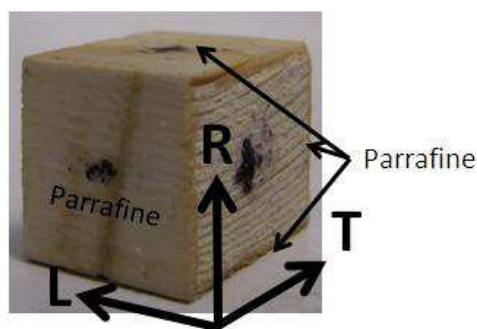


Figure 2-6 : Exemple d'un cube d'épicéa préparé pour l'essai de diffusion dans la direction L.

On réalise alors un suivi de la teneur en eau de ces échantillons dans le temps (Figure 2-7). On remarquera sur la courbe que les taux d'humidité dans les directions r , t et l tendent à se stabiliser à partir de 40 jours. À noter que cette « stabilisation » n'est en réalité pas vérifiée à 40 jours, car l'équilibre hydrique n'est pas atteint pour les échantillons R et T.

Malgré toutes les précautions prises sur le choix des échantillons, la teneur en eau mesurée à l'état d'équilibre diffère de plus ou moins 1 % d'un échantillon à l'autre du fait de l'hétérogénéité du bois.

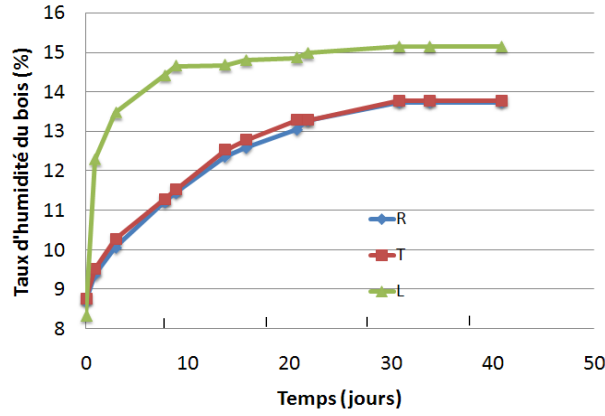


Figure 2-7 : Suivi de la teneur en eau en fonction du temps dans la plage d'HR [55 % ; 81 %] dans les directions r , t , et l (cas de l'épicéa).

Dans les calculs présentés au chapitre 5, les lois des transferts hydriques dans le bois reposent sur l'approche de Zillig (Zillig, 2009). Le modèle de diffusion est défini par l'équation 2-1 :

$$2-1 \quad \frac{\partial w}{\partial t} - \text{div}(\mathbf{D}(H_R) \nabla p_v) = 0$$

Où H_R est l'humidité relative en (-),

w est la masse d'eau dans le bois (kg/m^3),

D est le tenseur de diffusion dans le repère local R , T , L (s),

p_v est la pression de vapeur d'eau ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$).

En émettant plusieurs hypothèses simplificatrices (voir chapitre 5, §5.1.1), l'équation 2-1 devient :

$$2-2 \quad \frac{\partial H_R}{\partial t} - \frac{P_{\text{sat}} \mathbf{D}}{a_i \rho_0} \Delta H_R = 0$$

Où a_i sont les coefficients directeurs reliant le taux d'humidité dans le bois à l'humidité relative de l'air représentée par les courbes de sorption,

H_R est l'humidité relative (-),

P_{sat} la pression de saturation exprimée ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$),

D le tenseur de diffusion, dans ce cas exprimé (s), diagonal dans le repère orthogonal du bois,

Et ρ_0 la masse volumique du bois sec ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Le coefficient de diffusion est identifié par un calcul basé sur cette loi, utilisée dans le cas de diffusion thermique sur Abaqus :

$$2-3 \quad c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho} \Delta T = 0$$

Où c est la chaleur spécifique massique du matériau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$),
 T représente la température (K),
 λ est la conductivité thermique ($J.m^{-1}.K^{-1}.s^{-1}$),
et ρ est la masse volumique du matériau ($kg.m^{-3}$).

Par analogie, on a : $c = 1$ et $\frac{\lambda}{\rho} = \frac{Psat D}{a_1 \rho_0}$

Dans le calcul, comme dans l'expérience, on impose les conditions limites en « humidité relative ». Dans le cas de diffusion isotherme, on peut passer de l'humidité relative moyenne du solide calculée analytiquement (moyenne des humidités relatives obtenues pour chacun des points du solide) à une teneur en eau dans le bois en utilisant les courbes de sorption présentées précédemment (Figures 2-4 et 2-5). Cette courbe obtenue par le calcul numérique vient se caler à la courbe obtenue expérimentalement pour une valeur de $PsatD$ donnée. Les figures 2-8 et 2-9 présentent les courbes de diffusion théoriques (en pointillés) et expérimentales (courbes continues) dans les deux intervalles d'humidités relatives [55 % ; 81 %] et [81 % ; 97 %] pour les bois d'épicéa et de douglas, ceci dans les trois directions r , t et l .

Dans la littérature, on retrouve des coefficients de l'ordre de 10^{-8} à $10^{-11} m^2/s$ qui diffèrent d'un auteur à l'autre selon la méthode utilisée, l'essence de bois, les conditions de température et d'humidité relative (Mouchot, Wehrer, Bucur, & Zoulalian, 2000; Kouchade, 2004 ; Agoua, Zohoun, & Perré, 2001). Nos résultats sont donc cohérents en termes d'ordre de grandeur. En particulier, pour l'essence douglas, les données pour les directions R et T sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Merakeb (Merakeb, 2006) qui utilise une loi de diffusion exponentielle (pour la plage de diffusion considérée). On remarque aussi que les valeurs du coefficient de diffusion dans les directions r sont égaux ou légèrement supérieurs à la direction tangentielle pour les deux bois (l'épicéa et le douglas) tandis que dans la direction l il est supérieur aux coefficients mesurés dans les deux autres directions (3 à 10 fois supérieur selon le cas). Pour la plupart des essences de bois, le coefficient de diffusion dans la direction longitudinale est toujours le plus important avec une valeur 5 à 10 fois supérieure à la direction radiale, et le coefficient de diffusion est légèrement plus élevé en direction radiale qu'en direction transversale.

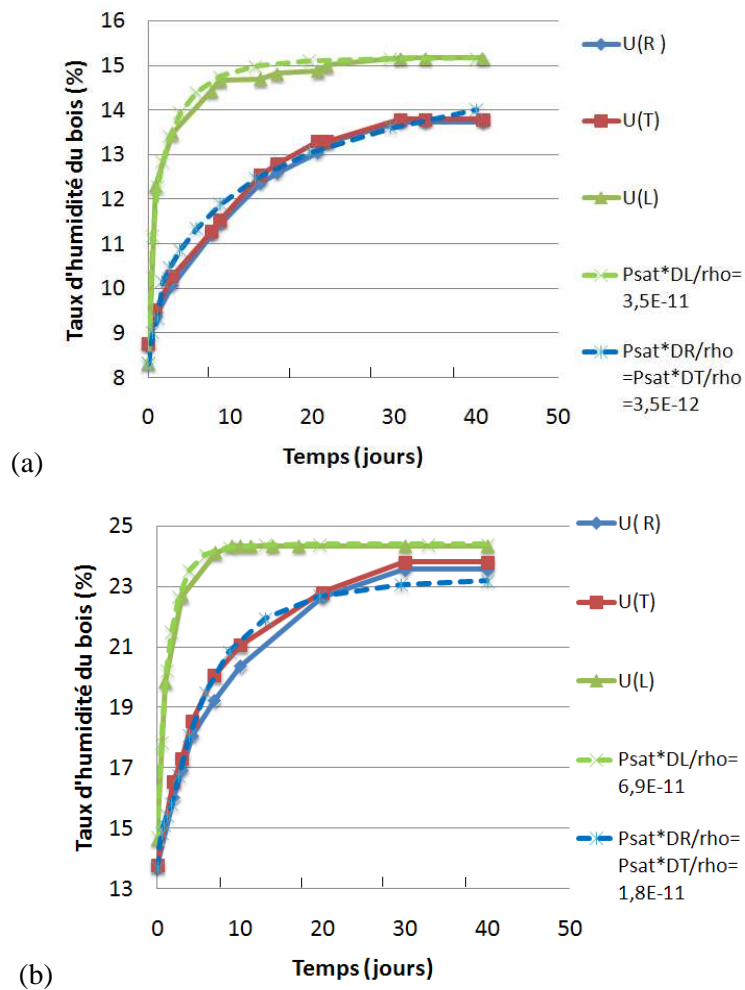


Figure 2-8 : Courbes représentant le taux d'humidité moyen dans le bois (a) initialement à l'équilibre à HR=55 % soumis à HR=81 %, (b) initialement à l'équilibre à HR=81 % soumis à HR=97 %, obtenues expérimentalement (traits pleins) et par le calcul (pointillés) pour le cas de l'épicéa. Les valeurs de $Psat.D/\rho$ indiquées sur les graphes sont exprimées en $m^2.s^{-1}$.

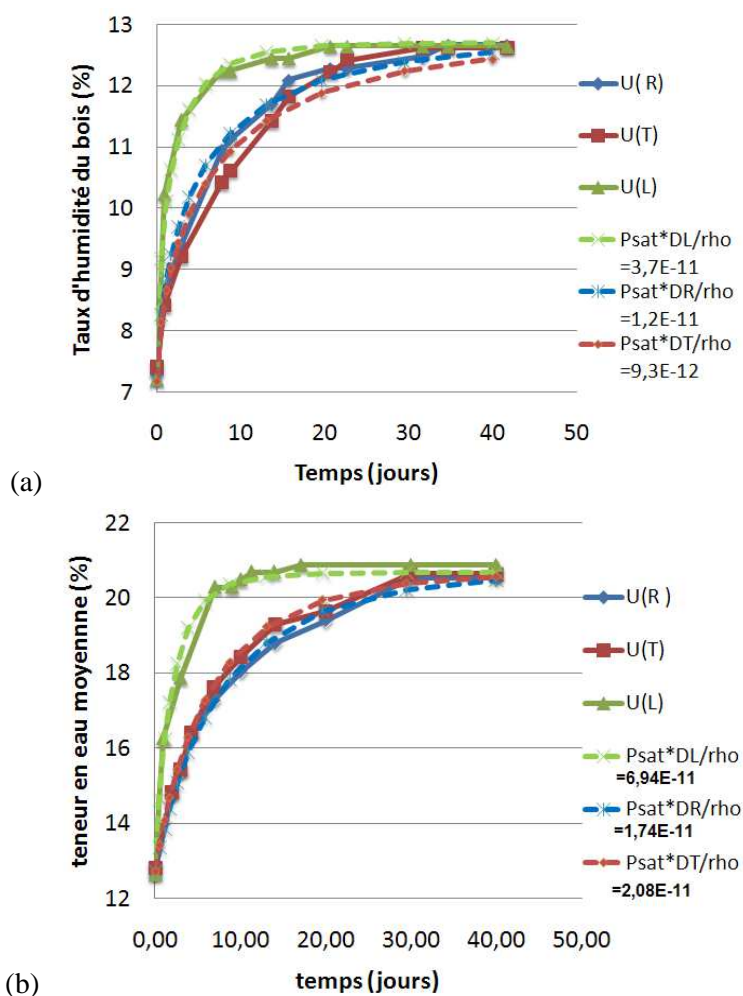


Figure 2-9 : Courbes représentant le taux d'humidité moyen dans le bois (a) initialement à l'équilibre à HR=55 % soumis à HR=81 %, (b) initialement à l'équilibre à HR=81 % soumis à HR=97 %, obtenues expérimentalement (traits pleins) et par le calcul (pointillés) pour le cas du douglas. Les valeurs de $\frac{Psat.D}{\rho_0}$ indiquées sur les graphes sont exprimées en $m^2.s^{-1}$.

Tableau 2-3 : Coefficients de diffusion en fonction de l'intervalle d'humidité relative (T=20 °C).

Bois	Épicéa		Douglas	
	55-81	81-97	55-81	81-97
$\frac{Psat D_R}{a_i \rho_0} (m^2.s^{-1})$	3,5E-12	1,7E-11	1,2E-11	1,7E-11
$\frac{Psat D_T}{a_i \rho_0} (m^2.s^{-1})$	3,5E-12	1,7E-11	9,3E-12	2,1E-11
$\frac{Psat D_L}{a_i \rho_0} (m^2.s^{-1})$	3,5E-11	6,9E-11	3,7E-11	6,9E-11

2.1.1.3 Retrait et gonflement du bois

Durant les essais de sorption, nous avons mesuré les variations dimensionnelles du bois à chaque état d'équilibre, par rapport à l'état anhydre, pour les mêmes valeurs d'humidité relative (Figures 2-10 et 2-11). Les mesures sont résumées dans le tableau 2-4.

Conformément à la bibliographie (chapitre 1), on vérifie bien la proportionnalité entre les déformations et la teneur en eau h dans le bois indépendamment des cas de sorption ou de désorption, et ceci pour des valeurs d'humidité relative allant de 0 à 97 % et donc pour une teneur en eau inférieure au point de saturation des fibres PSF. Les ordres de grandeur obtenus sont en accord avec les résultats bibliographiques. Les dispersions des mesures s'expliquent aussi en partie par le fait que les cernes peuvent présenter une légère courbure par rapport aux faces des cubes.

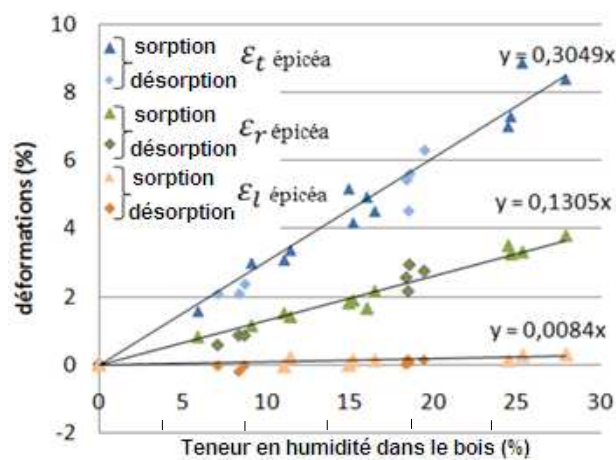


Figure 2-10 : Courbe représentant la dilatation hydrique mesurée expérimentalement pour le bois d'épicéa.

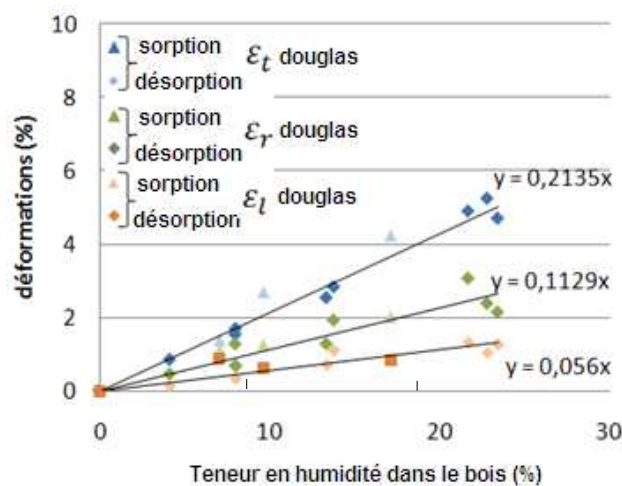


Figure 2-11 : Courbe représentant la dilatation hydrique mesurée expérimentalement pour le douglas.

Tableau 2-4 : Coefficients de dilatation mesurés dans les trois directions r , t et l pour les bois d'épicéa et de douglas.

	Épicéa	Douglas
α_r (%) (/°h)	0,30	0,21
α_t (%) (/°h)	0,13	0,11
α_l (%) (/°h)	0,01	0,06

2.1.2 Les colles

La structure bois-béton collée a été validée dans les travaux de Pham (Pham, 2007) avec un adhésif de type époxy. Cette colle est la plus fréquemment utilisée dans le collage structural du fait de ses grandes performances adhésives et mécaniques (Tableau 2-5).

Or il existe une grande variété de colles structurales qui présentent des propriétés mécaniques suffisantes. Dans le but de valider ou non l'utilisation de la résine époxy pour ce type de connexion, nous avons testé cinq adhésifs appartenant à trois familles de résine, en collaboration avec le fabricant **Sika®** :

- trois résines époxy : la *Sikadur®-32 LP* est utilisée dans le renforcement structural pour le collage de béton frais sur béton durci et la *Sikadur®-330* et la *Sikadur-30* respectivement pour le collage de plats pultrudés et de tissus à fibre de carbone sur structures de génie civil ;
- une résine polyuréthane bi-composant : la *Sikaforce®-7750L15* est désignée comme étant une « colle-mastic souple » adaptée dans le domaine industriel à la réalisation d'assemblages structuraux soumis en service à des contraintes dynamiques ;
- une résine acrylique modifiée : la *Sikafast®-5215* est recommandée dans le domaine industriel pour la réalisation d'assemblages structuraux de matériaux non poreux tels que les revêtements, les plastiques, les verres.

Le choix de ces colles repose sur la nécessité de vérifier l'effet des propriétés de la résine, notamment de sa raideur, sur le comportement de l'assemblage au niveau de l'interface. L'idée est de travailler avec des résines présentant des propriétés mécaniques suffisantes, au minimum égales à celles du bois en termes de résistance, mais adoptant des comportements différents.

2.1.2.1 Caractéristiques des résines

Des essais de caractérisation sur les résines structurales ont été menés au laboratoire départemental d'Autun. Le comportement mécanique de quatre colles (la *Sikadur®-330*, la *Sikadur®-30*, la *Sikaforce®-7750L15*, la *Sikafast®-5215*) a été déterminé via des essais de traction, à la température ambiante $T=20$ °C. Ces essais ont été réalisés sur une presse de capacité 10 kN à une vitesse de déplacement constant. Le comportement typique de ces trois colles non vieilles est représenté par la figure 2.12.

De même, la température de transition vitreuse T_g a été déterminée sur une DSC (*differential Scanning Calorimetry*) modulée Perkin Elmer. Cette donnée est importante puisqu'elle marque le passage de l'état vitreux figé vers l'état caoutchouteux de la résine. Les propriétés mécaniques de la colle sont fortement

modifiées lorsque les conditions thermiques sont supérieures à la température de transition vitreuse et l'adhésif ne permet plus d'assurer son rôle structural. La température de transition vitreuse T_g permet de déterminer les températures de service autorisées d'une structure.

Le tableau 2-5 présente les propriétés de ces résines tirées de leurs fiches techniques respectives et des essais réalisés au laboratoire d'Autun. Certaines données des fiches techniques diffèrent des caractéristiques mesurées au laboratoire d'Autun. Ceci s'explique par le fait que les essais de caractérisation ne sont pas les mêmes. Nous retiendrons néanmoins, notamment pour les caractéristiques mécaniques des colles mesurées en traction, que les données des fiches techniques sont cohérentes avec celles mesurées en laboratoire.

2.1.2.2 Vieillessement des résines

Des éprouvettes de différentes colles (Époxy Sika30, PU et AM) ont subi un vieillissement à 40 °C, 95 % HR pendant environ 1 an, selon un protocole de vieillissement mis au point au LR d'Autun. Les mesures réalisées ont montré que la T_g évolue peu pour toutes les résines après vieillissement et que les propriétés des résines en traction se dégradent pour tous les cas étudiés (assouplissement des résines) (Figure 2-12).

- Pour la résine Époxy Sika30 : on observe une chute du module (par moitié) et une chute de la résistance importante (le tiers).
- Pour la résine PU : on observe une légère chute de module et une augmentation de l'allongement ultime.
- Pour la résine AM : on observe une légère chute de module, mais une limite plastique diminuée de moitié.

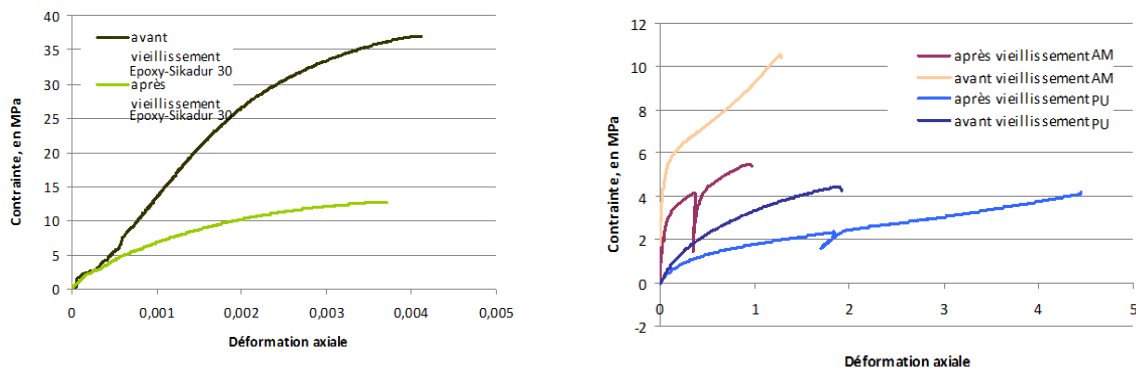


Figure 2-12 : Comportement en traction des trois colles utilisées avant et après vieillissement (a) Époxy sikadur30, (b) Acrylique Modifiée (AM) et Polyuréthane (PU).

Tableau 2-5 : Propriétés des colles utilisées à la température ambiante.

*ND= non déterminé

Résines	Sikadur®- 32 LP	Sikadur®- 330	Sikadur® 30	Sikaforce®- 7750L15	Sikafast®- 5215
Module d'élasticité compression (fiche technique) (MPa)	7800	ND*	9600	ND*	ND*
Résistance en compression (fiche technique) (MPa)	80	ND*	85	ND*	ND*
Module d'élasticité traction (fiche technique) (MPa)	ND*	4500	11200	ND*	ND*
Module d'élasticité traction (essais DL Autun) (MPa)	ND*	5200	12000	10	200
Résistance en traction (fiche technique) (MPa)	ND*	30	26	5	10
Résistance en traction (essais DL Autun) (MPa)	ND*	32	32	4,5	10
Allongement à la rupture (fiche technique) (%)	ND*	0,9	ND*	350	150
Allongement à la rupture (essais DL Autun) (%)	ND*	0,7	0,3	200	130
Comportement	ND*	Élastique	Élastique	Élastoplastique	Hyperélastique
Densité	1,6	1,3	1,65	1,23	1,18
Température de transition vitreuse (fiche technique) (°C)	68	ND	62	-50	50
Température de transition vitreuse (Essais DL Autun) (°C)	67	63	50	< 50	70
Retrait (%)	< 0,1	ND*	0,04	ND*	ND*
Temps d'application A T=20 °C	2 h	ND*	1 h 30	15 min	5 min

2.1.3 Les bétons

Nous avons utilisé deux types de matériaux cimentaires :

- (1) le mortier est utilisé dans le cadre d'essais préliminaires notamment pour les essais de vieillissement. Nous avons choisi de travailler avec le mortier normalisé conformément à la norme EN 196-1 ;
- (2) le BFUP est le béton utilisé dans les travaux de Pham (Pham, 2007) pour la conception de structures mixtes bois-béton collées. Précisément, nous avons utilisé deux bétons fibrés ultra-performants BFUP : le BSI Céracem et le Ductal.

Ces bétons sont des matériaux qui ont fait l'objet de nombreux travaux. On se basera notamment sur la bibliographie pour définir les propriétés de ces matériaux (Tableau 2-6).

Tableau 2-6 : Propriétés des bétons utilisés.

*Données du *Guide AFGC BFUP* (AFGC, 2002)

** Essais de retraits endogènes effectués au laboratoire Navier, mesures prises 24 h après gâchage.

Bétons	Mortier	BSI Ceracem	Ductal
Module de Young (MPa)	40000	65000 *	58000 *
Coefficient de poisson	0,3	0,2 *	0,2 *
Résistance caractéristique en traction directe (MPa)	3	9 *	9,1 *
Résistance caractéristique en traction par flexion (MPa)	7	42 *	45 *
Résistance caractéristique en compression (MPa)	40	180 *	200 *
Retrait endogène total (µm/m)	400 **	570 *	550 *

Les bétons peuvent être collés après leur prise (à 28 jours), ou frais sur le bois, selon la colle utilisée. Dans les cas où le béton est collé frais, il est important de prendre en compte l'effet du retrait du béton dans les calculs (chapitre 1, paragraphe 1.2.3).

2.2 Méthodes expérimentales

Les travaux expérimentaux de la thèse se divisent en deux grandes parties menées parallèlement. La première vise à choisir une résine et à proposer un mode de collage optimisant le comportement en cisaillement d'un assemblage bois-béton. La deuxième partie a pour but d'analyser précisément le

comportement d'un assemblage collé bois-béton soumis à des chargements climatiques et de déterminer les paramètres susceptibles d'induire l'endommagement d'un assemblage collé bois-béton. Nous présenterons dans ce paragraphe les différentes campagnes expérimentales menées dans cette étude.

2.2.1 Essais mécaniques : essais Push-Out

L'essai Push-Out est le test de cisaillement choisi pour évaluer le comportement à l'interface de l'assemblage bois-béton. L'échantillon de l'essai se compose de deux blocs de bois collés à un bloc en béton (Figure 2-13).

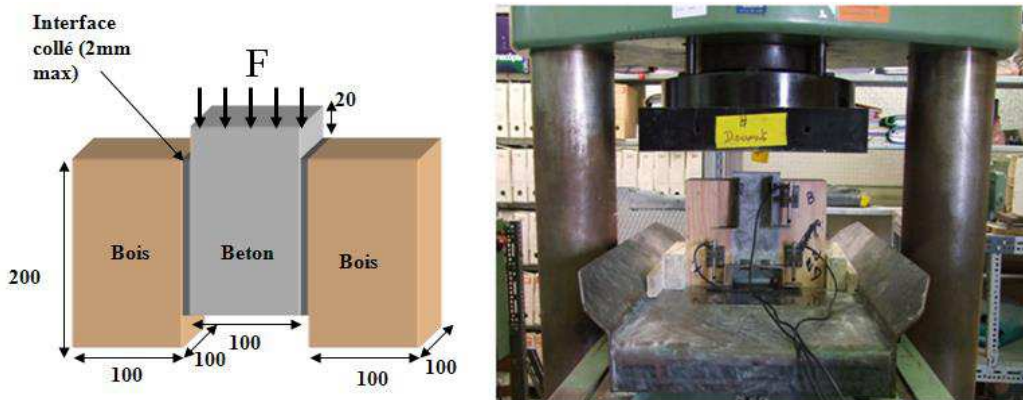


Figure 2-13 : Principe de l'essai Push-Out.

Les blocs de bois et de béton sont des pavés de 100 mm d'épaisseur, 100 mm de largeur et 200 mm de hauteur.

Des travaux de simulation numérique et une série d'essais effectués par le laboratoire d'Autun en 2009, antérieurement aux travaux de thèse, ont permis de mettre au point le test Push-Out adapté au collage bois-béton (Guyot & Chataigner, 2009 ; Chataigner & Flety, 2009). Ces travaux justifiant l'utilisation de cet essai, le protocole de fabrication et expérimental du test sont présentés au chapitre 3.

L'essai permet de répondre à trois objectifs :

- (1) Déterminer le type de résine le mieux adapté pour un assemblage bois-béton.
- (2) Analyser les propriétés d'adhérence de l'interface
- (3) Étudier l'effet du vieillissement sur les propriétés d'adhérence de cette résine.

Ainsi, la campagne expérimentale réalisée a eu pour but de choisir la colle la plus performante. Pour cela, nous avons fabriqué cinq corps d'épreuves avec quatre des cinq colles présentées en 2.1.2 (la Sikadur®-330, la Sikadur®-30, la Sikaforce®-7750L15, la Sikafast®-5215) soit au total 20 échantillons. Les blocs de béton utilisés ont 28 jours lors de la réalisation de l'assemblage et ont donc été collés durcis sur le bois. Il s'agit du BSI CERACEM. Douze échantillons (soit trois échantillons pour chaque colle), stockés en salle ambiante, ont été testés trois mois après l'assemblage des trois blocs. Les huit restants ont été placés

en salle de vieillissement et testés après un an pour évaluer le comportement en cisaillement des colles après vieillissement hydrique ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et humidité relative H_R variable entre 50 % et 95 %).

2.2.2 Tests de chargement hydrique

L'étude du comportement de l'assemblage bois-béton soumis à des chargements hydriques a pour objectif de déterminer les paramètres qui gouvernent les mécanismes d'endommagement, en particulier au niveau de la connexion collée. Ainsi, nous avons étudié les effets de l'anisotropie et de l'hétérogénéité du bois en faisant varier la nature du bois et pour un même bois en faisant varier également le sens des cernes par rapport au plan de collage. De même les effets des propriétés de la colle et du type de matériau cimentaire ont été mis en évidence en faisant varier les matériaux. Les campagnes expérimentales menées sont décrites dans ce paragraphe. Toutes les configurations étudiées sont résumées dans le tableau 2-7. Le chapitre 4 présente les résultats expérimentaux qui seront ensuite confrontés à des simulations numériques dans le chapitre 5.

2.2.2.1 Les corps d'épreuves

Les corps d'épreuve sont constitués d'une lamelle de bois lamellé-collé d'épicéa ou de douglas d'épaisseur 30 à 40 mm, et de 18 à 20 mm de mortier ou de BFUP selon les cas. Ces deux matériaux sont assemblés au moyen de 1 à 2 mm de colles structurales. Les techniques de collage peuvent différer selon les cas étudiés (collage frais ou durci) ; elles seront décrites plus précisément dans le chapitre 4. À noter que l'épaisseur de la colle est si possible maintenue constante, la technique de collage pouvant induire de légères différences entre les échantillons.

Le bois étant un matériau hétérogène, les échantillons ont été choisis de façon à minimiser les divergences expérimentales liées à la structure du bois. Les cernes étant un facteur important dans le comportement hygro-mécanique du bois, nous avons veillé à ce que leur géométrie (taille et forme des cernes) soit très proche d'un échantillon à un autre pour un bois donné.

Pour exemple, des corps d'épreuves sont présentés sur la Figure 2-14.

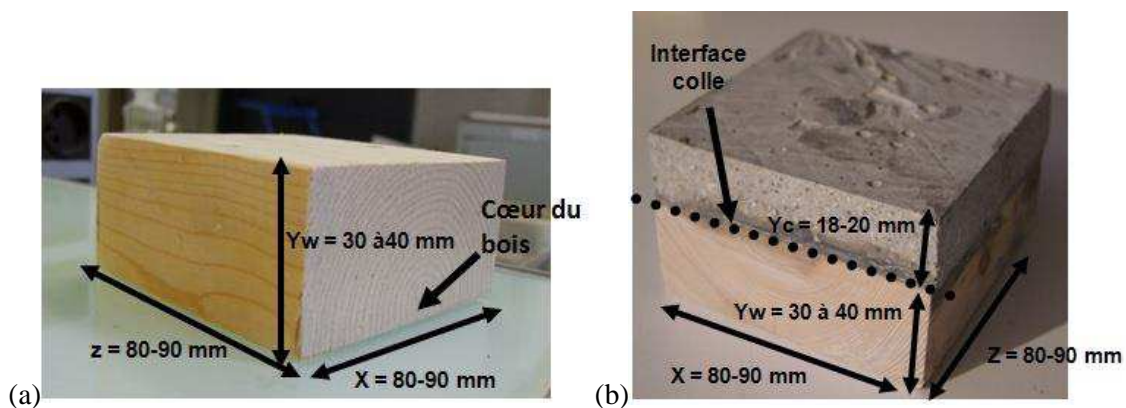


Figure 2-14 : Exemples d'échantillons testés hydriquement (a) échantillon de bois seul, (b) assemblage bois-mortier collé via l'Époxy Sika 32LP.

2.2.2.2 L'essai d'imbibition

L'essai dit « d'imbibition » mis en place consiste à imbiber un échantillon de bois-béton à la « base » dans environ 2 mm d'eau (humidification par la face inférieure). L'assemblage, notamment le bois est soumis à des conditions d'humidité extrêmes. Ainsi l'eau diffuse dans le bois du bas vers le haut et provoque le gonflement rapide du bois. Ce type d'essais permet d'étudier l'influence des déformations du bois induites par la prise d'humidité sur la tenue d'un assemblage collé. On rappelle que le gonflement d'une pièce de bois n'est pas homogène et dépend de sa position relative au cœur. Ainsi, nous disposons d'un bois lamellé-collé d'épicéa dont l'aspect structurel nous a permis d'étudier deux situations (Tableau 2-7) :

- le cas où le cœur se trouve au niveau de l'interface, on dira que le bois est collé dans le sens « convexe » ;
- le cas où le cœur se trouve au niveau de la face imbibée, donc assemblé dans le sens « concave ».

Tableau 2-7 : Tests d'imbibition : récapitulatif des essais réalisés.

Test	Bois	Béton	Colle	Échantillon
Imbibition	Épicéa convexe	Mortier	Époxy 32LP	
	Épicéa concave	Mortier	Époxy 32LP	
	Épicéa convexe	Mortier	Acrylique modifiée	
	Épicéa concave	Mortier	Acrylique modifiée	
	Épicéa convexe	Mortier	Polyuréthane bi-composant	
	Épicéa concave	Mortier	Polyuréthane bi-composant	

2.2.2.3 Tests de chargement hydrique sous humidité relative élevée

Ces tests consistent à faire subir à l'échantillon des chargements hydriques plus réalistes que le cas de l'imbibition. L'échantillon initialement stabilisé à une humidité relative de l'air de 55 % est placé dans une enceinte à 97 % d'humidité relative. L'humidification s'effectue par les faces latérales (la diffusion selon le sens long est empêchée) et la face inférieure de l'échantillon. Le dispositif expérimental est décrit plus précisément dans le § 2.3.1.4. La diffusion de vapeur d'eau dans l'assemblage va induire des déformations notamment dans le bois. Ces déformations dans le bois, empêchées par le béton collé vont induire des contraintes au niveau de l'interface bois-béton.

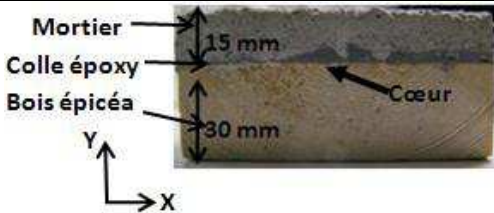
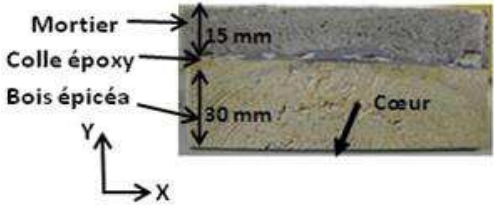
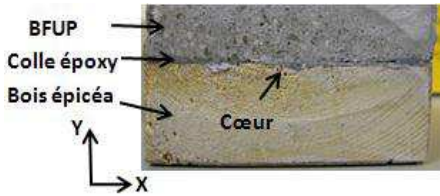
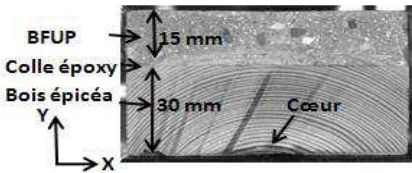
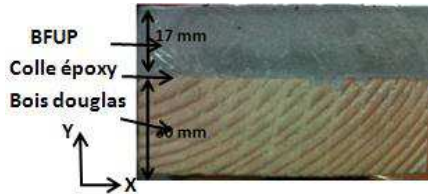
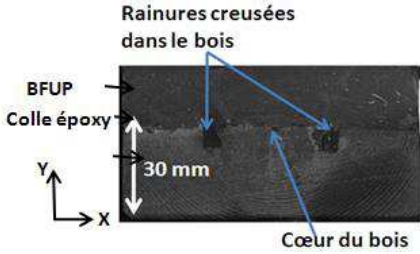
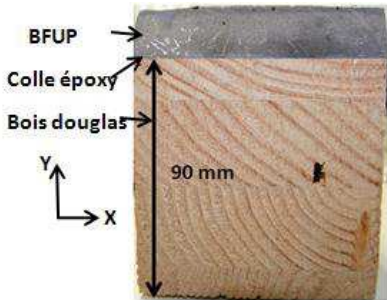
Les objectifs de ces essais sont :

- d'évaluer les mécanismes d'endommagement de l'assemblage dans le cas de chargement sous humidité relative et de déterminer des critères de rupture ;
- d'étudier les effets de la nature du bois, de l'anisotropie du bois et de la rigidité du matériau cimentaire sur le comportement sous humidité relative d'un assemblage;
- de les confronter à des simulations numériques afin de les valider (chapitre 5).

L'essai de chargement sous HR=97 % a été effectué pour les deux mêmes situations étudiées dans le cas des tests d'imbibition (cernes convexes et concaves avec le bois d'épicéa comme décrit au paragraphe précédent) et sur le douglas qui présente un aspect structural totalement différent de l'épicéa du point de vue de l'épaisseur des cernes et du sens des cernes (Tableau 2-8). Seule la résine époxy a été ici considérée. Des essais supplémentaires ont été réalisés, l'un pour proposer une solution alternative moins dommageable (réalisation de rainures dans le bois), l'autre pour prendre en compte une section complète d'une poutre lamellée-collée (trois lamelles).

L'essai est sévère si l'on compare ce cas à celui d'une structure de grande taille soumise à des conditions climatiques extérieures pour lesquelles l'humidité relative n'atteindra pas des valeurs aussi élevées. Cependant, il peut permettre de valider des simulations numériques en exploitant des cartes de déformations obtenues grâce à la technique de corrélation d'images dont le principe est décrit dans le paragraphe suivant (§ 2.3).

Tableau 2-8 : Tests d'humidification sous HR=97 % : récapitulatif des essais réalisés.

Test	Bois	Béton	Colle	Échantillon
HR = 97 %	Épicéa convexe	Mortier	Époxy 32LP	
	Épicéa concave	Mortier	Époxy 32LP	
	Épicéa convexe	BFUP	Époxy 32LP	
	Épicéa concave	BFUP	Époxy 32LP	
	Douglas	BFUP	Époxy 32LP	
Essais complémentaires	Épicéa convexe avec rainures	BFUP	Époxy 32LP	
HR=97 %	Douglas plusieurs lamelles	BFUP	Époxy 32LP	

2.3 Exploitation des essais : analyse par corrélation d'images 2D

La corrélation d'images est un outil de plus en plus utilisé depuis deux décennies et ceci dans les domaines de la mécanique, des sciences des matériaux et de la mécanique des fluides. Ainsi la littérature concernant cette méthode est abondante et en pleine expansion étant donné les avantages qu'elle présente. En effet, la technique permet de mesurer et de visualiser de manière non destructive, sans contact, localement, et quantitativement des champs de déplacement et de déformation de matériaux, notamment de matériaux hétérogènes, soumis à une sollicitation mécanique, thermique ou hydrique. Elle donne la possibilité par exemple pour un matériau donné de déterminer des paramètres d'identification mécanique (Hild & Roux, 2006), et thermique (Pottier, 2010), voire de valider des simulations numériques par comparaison de cartes de déformations expérimentales et théoriques.

La technique de corrélation d'images numériques est la principale technique utilisée pour l'exploitation des essais au cours des travaux de thèse. Elle permet d'observer localement le comportement de l'assemblage, notamment de l'interface, via des cartes de déformations au cours d'essais mécaniques (essais d'adhérence Push-Out, chapitre 3) et d'essais de vieillissement (tests de chargement hydrique, chapitre 4) et de valider un modèle numérique du comportement de l'assemblage (chapitre 5).

2.3.1 Principe de la technique de corrélation d'images 2D

Le principe de la technique de corrélation d'images numériques (DIC pour Digital Image Correlation) est de retrouver les points de l'image dite de référence prise à l'instant t_0 (état initial) dans une séquence d'images déformées, prise à un temps t (état déformé), au cours de la sollicitation en se basant sur la « ressemblance » de leur voisinage et d'en déduire le champs de déplacement puis de déformation par dérivation discrète. Le calcul du champ de déplacement puis de déformation se fait à l'aide d'un logiciel maison, CMV, développé par M. Bornert (Bornert, 2003).

2.3.1.1 Mesure du champ de déplacement

Le programme CMV permet de définir dans l'image de référence un ensemble de points, répartis selon une grille régulière, auxquels on associe un domaine de corrélation D (Figure 2-15 a). Il retrouve après traitement ces points dans les images représentant les configurations déformées. Cette opération est menée automatiquement, en utilisant une technique qui repose sur l'exploitation du contraste local des images (Figure 2-15 b). Dans les cas où l'évolution est trop importante entre deux images ou lorsque le contraste est insuffisant, il est possible d'assister manuellement le traitement. L'appariement est effectué via la minimisation d'un coefficient de corrélation C qui mesure la ressemblance entre les domaines de corrélation dans les deux images. On en déduit le champ de déplacement (Bornert, et al., 2008 ; Doumalin, 2000 ; Vales, 2008).

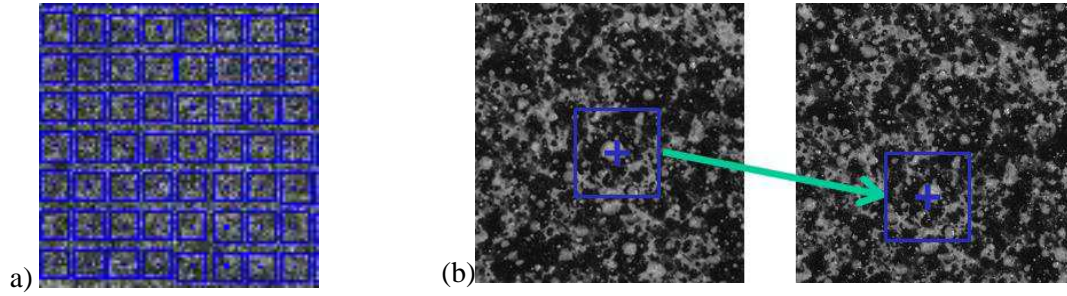


Figure 2-15 : a) Grille sur laquelle est déterminé le champ de déplacement. b) Suivi du niveau de gris, en un point de la grille.

Prenons sur l'image de référence un point matériel i . Ce point est repéré respectivement sur l'image de référence et sur l'image déformée par ses coordonnées (en pixels) \vec{X}_i et \vec{x}_i . On cherche à déterminer la fonction φ de transformation telle que :

$$2-4 \quad \vec{x}_i = \varphi(\vec{X}_i)$$

Les images sont représentées en tout point par leurs niveaux de gris. L'image de référence est décrite par la fonction f et les images déformées par la fonction g . Sous l'hypothèse que les niveaux de gris sont parfaitement transportés par la transformation mécanique, nous avons :

$$2-5 \quad g(\varphi(\vec{X}_i)) = f(\vec{X}_i)$$

En pratique, cette condition est toutefois rarement vérifiée car, d'une part, les processus de génération des images sont naturellement bruités, et d'autre part, les conditions d'imagerie peuvent évoluer entre l'état de référence et l'état déformé (du fait de l'évolution de l'éclairage, de la caméra, ou encore, comme dans notre cas, du matériau lui-même, qui change légèrement d'aspect lorsqu'il prend l'eau). Pour tenir compte de ces phénomènes, l'équation 2-5 peut être relâchée en :

$$2-6 \quad g(\varphi(\vec{X}_i)) = a f(\vec{X}_i) + b + g'$$

Où a et b représentent les évolutions du contraste et de la brillance moyennées sur la taille de la fenêtre de corrélation et g' un bruit aléatoire d'origines diverses.

Le but de la corrélation d'images est de trouver la transformation φ à partir des niveaux de gris f et g des images. Ce problème est malheureusement mal posé et ne peut pas être résolu exactement. Ainsi on cherche la meilleure approximation de φ parmi un ensemble de transformations simplifiées (par exemple les translations uniformes sur le domaine de corrélation). On retient la transformation approchée qui respecte au mieux l'équation 2-6, au sens de la minimisation d'un coefficient de corrélation $C(\varphi)$ qui mesure l'écart à l'équation 2.6 sur tout le domaine de corrélation D .

Le coefficient de corrélation utilisé dans le logiciel CMV autorise des variations de contraste et de brillance puisqu'il est calculé à partir des variations de niveau de gris. Ceci annule l'effet des termes a et b de l'équation 2-6 (Doumalin, 2000). Il est défini par :

$$2-7 \quad C(\varphi) = 1 - \frac{\sum_{i \in D} (f(\vec{X}_i) - \bar{f}_D) \cdot (g(\vec{X}_i) - \bar{g}_D)}{\sqrt{\sum_{i \in D} (f(\vec{X}_i) - \bar{f}_D)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i \in D} (g(\vec{X}_i) - \bar{g}_D)^2}}$$

Avec D , domaine de corrélation associé au point i considéré,
 \bar{f}_D et \bar{g}_D , les moyennes des niveaux de gris sur le domaine D .

Ne connaissant pas la fonction φ réelle, on en recherche une approximation φ_0 , appelée fonction de forme, sur le domaine de corrélation D , dépendant d'un petit nombre de paramètres, et on cherche les paramètres qui minimisent la valeur du coefficient de corrélation $C(\varphi_0)$ qui permet alors de calculer les deux composantes de déplacement. Dans CMV, la transformation est supposée être une simple translation, éventuellement couplée à une rotation, et une déformation homogène, dont le gradient est égal au gradient macroscopique ou au gradient local. En pratique, du fait de la nature discrète des images, la minimisation de ce coefficient permet d'abord la détermination des déplacements au pixel près. Dans un deuxième temps, une optimisation des composantes de translation avec une précision sub-pixel est réalisée, par interpolation bilinéaire, bicubique ou biquintique (bilinéaire dans CMV par défaut) des niveaux de gris de l'image déformée (Doumalin 2000).

Lorsque la position des points centraux des domaines homologues est déterminée en termes de coordonnées, il est possible de déterminer le champ de déplacement \vec{u} des points dans le plan d'observation selon :

$$2-8 \quad \vec{u}(\vec{X}_i) = \varphi_0(\vec{X}_i) - \vec{X}_i$$

2.3.1.2 Calcul du champ de déformation

À partir du champ local de déplacement obtenu, les déformations locales sont déduites. Le champ de déformation $\underline{\underline{E}}$ est calculé à partir du champ de déplacement au sens de Green-Lagrange (équation 2-10) :

$$2-9 \quad \underline{\underline{E}} = \frac{1}{2} (\underline{\underline{F}}^T \cdot \underline{\underline{F}} - \underline{\underline{1}})$$

Où $\underline{\underline{F}}$ est le gradient moyen de la transformation φ sur le voisinage choisi, $\underline{\underline{F}}^T$, sa transposée et $\underline{\underline{1}}$ la matrice unité.

La transformation φ dont dérive $\underline{\underline{F}}$ n'étant connue que de manière discrète, la déformation en un point est déterminée par la moyenne du gradient de la transformation sur un domaine d'intégration Ω délimité par des points voisins. La déformation en un point est ainsi calculée à partir de la moyenne du gradient de

transformation $\underline{\underline{F}}$ sur ce voisinage. Ce gradient moyen est calculé par une intégrale de contour faisant appel aux positions initiales et finales des points de mesure délimitant le contour du voisinage, et en adoptant une hypothèse de linéarité des déplacements entre 2 points de mesure (Allais, Bornert, Bretheau, & Caldemaison, 1994).

Quatre schémas d'intégration sont possibles avec le logiciel *CMV* (Figure 2-16). On choisira le domaine d'intégration suivant que l'on souhaite obtenir des informations plus locales ou gagner en précision. Dans notre cas, nous avons choisi de travailler avec le schéma d'intégration 2 qui permet d'obtenir une bonne précision et une mesure locale suffisante dans le cadre de nos travaux. Le choix du schéma considéré définit la base de mesure des déformations.

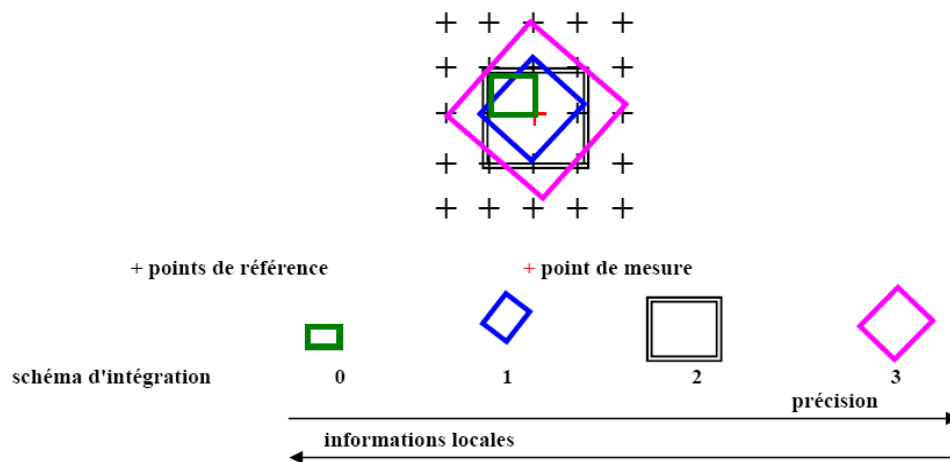


Figure 2-16 : Schémas d'intégration (Vales, 2008) en un point de la grille.

Ce calcul conduit aux quatre composantes planes du gradient de la transformation. Pour en déduire celle du tenseur des déformations de Green Lagrange, on fait l'hypothèse que le plan d'observation est un plan principal de déformation (*i.e.* qu'il contient deux directions principales de déformation) et qu'il n'y a pas de rotation hors plan. Compte tenu de la géométrie de nos essais et du faible niveau des déformations atteintes, cette hypothèse est raisonnable (en pratique, le recours à la déformation linéarisée serait d'ailleurs suffisant). La troisième valeur propre du tenseur des déformations (selon la direction normale au plan d'observation) est en revanche inaccessible à une observation surfacique. Du fait de l'anisotropie du bois et de la géométrie des essais considérés, les hypothèses usuelles d'axisymétrie, de déformation plane ou isochore ne s'appliquent pas.

Le calcul des déformations étant effectué, des cartographies de déformations seront dessinées sur le champ optique considéré, permettant ainsi de détecter les éventuelles hétérogénéités de déformation en lien avec les caractéristiques des matériaux.

Les évolutions des déformations pourront ainsi être évaluées à partir des données issues du calcul des déformations selon les hypothèses définies ci-dessus pour obtenir des informations plus quantitatives. Seront représentées les composantes XX et YY du tenseur des déformations associées aux axes X et Y des échantillons (Figure 2-14) ainsi que les « déformations équivalentes au sens de Von Mises » afin de

s'affranchir du repère choisi. Cette déformation est définie par $\varepsilon_{eq} = 2/3 |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$, où ε_1 et ε_2 sont les deux valeurs principales de déformation dans le plan d'observation. Elle permet de caractériser les distorsions dans le plan. Dans le premier cas (composantes XX et YY), en chaque point de la grille, la composante de déformation étudiée est symbolisée par une croix caractérisée par une couleur, fonction de sa valeur calculée au voisinage du point. Dans le deuxième cas (déformations équivalentes de Von Mises), la couleur est associée à l'intensité de la déformation équivalente, et la direction du grand axe de la croix indique la première direction propre de la déformation locale (*i.e.* celle associée à la déformation principale la plus grande). La représentation des cartes de déformations au sens de Von Mises permet de s'affranchir des axes de l'éprouvette. Cette représentation ne tient pas compte des axes locaux du bois (directions d'anisotropie), mais permet de synthétiser les champs de mesure en une seule carte. Des développements futurs consisteraient à définir les composantes de déformations locales dans le sens tangentiel ou le sens radial, qui auraient un sens physique vis-à-vis des propriétés du bois. Dans le cadre de ce travail, la représentation au sens de Von Mises reste cependant suffisante.

La pertinence des mesures par rapport aux phénomènes physiques à étudier est fonction des incertitudes de mesures décrites dans le paragraphe suivant.

2.3.1.3 Évaluation des incertitudes de mesures

a) Origine des incertitudes

Comme explicité par Nguyen T.L. (Nguyen, 2011) selon Bornert et al. (Bornert et al., 2008), les incertitudes de mesure en termes de déplacement sont liées à un grand nombre de paramètres que l'on peut séparer en trois grandes familles : (i) l'éprouvette et le système de chargement, (ii) le système d'acquisition, (iii) le choix des algorithmes utilisés. Les erreurs en lien avec ces trois familles sont :

- les erreurs liées à l'éprouvette et à la sollicitation (déplacement hors plan de l'éprouvette, planéité de l'échantillon, taille et contraste du mouchetis⁴...) ;
- les erreurs liées à la qualité des images (positionnement de la caméra perpendiculairement à l'échantillon, réglage de netteté, distorsion optique des objectifs, bruit des capteurs CCD et de l'électronique associée, lumière, résolution des images en termes de pixels, codage des images -8 bits ou plus...) ;
- les erreurs liées à l'algorithme de la corrélation (dimension du motif, dimension de la grille, choix du coefficient de corrélation, type d'interpolation des niveaux de gris, forme du champ de déplacement, algorithme de recherche sub-pixellique...).

Les essais de corrélation d'images nécessitent une mise au point de la technique. Cette mise au point se fait avant chaque essai en deux étapes : (1) optimiser l'image et l'essai afin de minimiser les erreurs dues à

⁴ Si le contraste naturel de l'échantillon analysé n'est pas suffisant, il est possible de réaliser un marquage de type « mouchetis » (dépôt de gouttes de peinture sur la surface observée qui accompagnent le mouvement en surface de l'échantillon).

la mise en place de l'essai, (2) évaluer les incertitudes, notamment intrinsèques à la caméra et à la méthode de mesure, incluant l'algorithme de corrélation, et ainsi pouvoir les prendre en compte lors de l'exploitation des cartes de déplacements et de déformation.

b) Minimiser les erreurs, mise en place de l'essai

Pour améliorer la précision de mesures, il faut avant chaque essai vérifier que :

- les déplacements hors plan sont minimisés voire empêchés, les emplacements de la caméra et de l'échantillon doivent être fixés. Dans le cas des études menées, notamment pour les essais sous imbibition ou sous humidité relative H_R élevée, les déformations selon la direction L étant négligeables (notamment pour le bois épicea), il est raisonnable de considérer que l'échantillon est fixe ;
- l'éclairage à l'aide d'une source lumineuse est suffisant et le plus homogène possible sur l'ensemble de la surface observée. Il a été choisi d'utiliser, pour les essais sous imbibition ou sous humidité relative H_R élevée, un éclairage latéral avec des LED de lumière bleue car le rendement de la caméra utilisée est optimal pour cette longueur d'onde. Par ailleurs, les mesures ont été effectuées dans un local à l'abri des variations diurnes de luminosité ;
- l'histogramme de niveau de gris s'étend au maximum, au mieux sur la plage entière [0,255], et ne sature pas. En effet, l'analyse d'image trop contrastée ou peu contrastée peut induire une variation du coefficient de corrélation, et rendre l'analyse d'image difficile. Comme le contraste naturel de l'échantillon analysé n'est pas suffisant, il a été réalisé un marquage de type « mouchetis » (dépôt de gouttes de peinture sur la surface observée). Ce mouchetis a été réalisé à la bombe aérosol. Il a été choisi de réaliser un marquage par peinture noire et blanche, caractérisé par des tailles de gouttes très petites. À noter que des études menées dans le laboratoire ont montré que la peinture pouvait modifier la capacité de l'échantillon à absorber de l'eau et ainsi modifier les déformations hydriques induites. Pour les essais sous humidité relative H_R élevée, la couche de peinture est fine pour minimiser les biais de mesures (déformations mesurées différentes de celles attendues).

La mise en place et la validation de l'utilisation de la technique de corrélation d'images pour les essais de vieillissement hydrique est décrite plus précisément au chapitre 4. Les mesures ont été effectuées dans un local climatisé, étant donné la durée des essais sous imbibition ou sous humidité relative H_R élevée, afin de ne pas introduire de biais supplémentaires (dépendance à la température).

c) Évaluer les erreurs

Les conditions de l'essai étant optimisées, il est nécessaire d'évaluer les erreurs « intrinsèques » à la technique de corrélation. Ces sources d'erreurs sont liées en particulier à la qualité de l'acquisition d'images (notamment le bruit des images numériques, noté g' plus haut), l'imperfection du marquage, aux défauts de géométrie des appareils optiques et aux approximations de l'algorithme de corrélation,

notamment celles induites par l'interpolation des niveaux de gris requises pour accéder à une précision subpixel, ou celles dues à une fonction de forme inadéquate. On pourra se référer aux travaux de Bornert (Bornert, et al., 2008), Doumalin (Doumalin, 2000), Wang (Wang, Héripré, El Outmani, Caldemaison, & Bornert, 2010), Fazzini (Fazzini, 2009), Dautriat (Dautriat, 2009) pour une discussion plus approfondie sur les sources d'erreurs.

Les erreurs sont quantifiées en exprimant la différence entre le déplacement mesuré et le déplacement réel. L'erreur systématique ΔX est définie comme étant la moyenne des différences entre les déplacements mesurés et théoriques pour tous les points de l'image présentant le même déplacement subpixel, *i.e.* pour lesquels les mêmes erreurs d'interpolation sont faites ; l'erreur aléatoire σ_x représente l'écart-type entre ces deux déplacements. L'erreur systématique est fortement liée à la nature du marquage, au mode d'échantillonnage du signal et à la méthode d'interpolation des niveaux de gris sur le domaine de corrélation pour le calcul des déplacements de points à des valeurs fractionnaires de pixels. L'évolution de cette erreur avec la partie fractionnaire du déplacement prend la forme d'une « courbe en S » (Doumalin, 2000 ; Dautriat, 2009). Cette erreur est maximale lorsque le déplacement d'un point approche une valeur entière de pixel. En conséquence, lorsque les déformations globales sont faibles, la carte des déformations est marquée par l'apparition de bandes de « moiré ». La forme précise de la courbe d'erreur dépend de la qualité de l'interpolation et donc du contraste local dans le domaine de corrélation. L'erreur sera d'autant plus marquée que les niveaux de gris sont difficiles à interpoler, c'est-à-dire lorsque les taches de mouchetis sont petites par rapport à la taille d'un pixel. L'erreur aléatoire est principalement induite par le bruit des images, qui peut être quantifié par ailleurs (Wang, 2010).

La quantification précise des erreurs aléatoires et systématiques associées aux conditions réelles d'un essai particulier est souvent tentée par l'analyse d'images simulées, par comparaison entre les déplacements évalués par corrélation et les déplacements imposés pour simuler les images. Mais la pertinence de cette analyse dépend beaucoup de la pertinence de l'algorithme de simulation, difficilement quantifiable. La procédure suivie dans notre étude est à la fois plus simple et moins ambiguë puisqu'elle repose sur l'analyse de deux images réelles ; il s'agit de celle déjà mise en œuvre par Dautriat (Dautriat, 2009).

En pratique, il s'agit d'imposer une déformation homogène (même déformation globale dans les directions X et Y) en déplaçant la caméra selon l'axe z (axe perpendiculaire au plan d'observation). Ce déplacement hors plan simule une dilatation ou un retrait de l'image. Prenons un échantillon de bois dont la face observée par la caméra mesure 65 mm*40 mm, sur lequel nous avons appliqué un mouchetis (Figure 2-17). Nous avons réglé la caméra de façon à ce qu'elle prenne un champ de 70 mm de côté. La caméra utilisée permet de prendre des images de 2048*2048 pixels. La résolution des images est dans ce cas de 35 μ m/pixel. En réduisant légèrement la distance entre la caméra et l'objet, typiquement de 0,5 mm pour l'objectif utilisé, grâce à une platine micrométrique sur laquelle est montée la caméra, il est possible d'augmenter légèrement le grandissement optique, si bien que l'échantillon apparaîtra légèrement plus grand : il mesurera typiquement 1 à 2 pixels de plus.

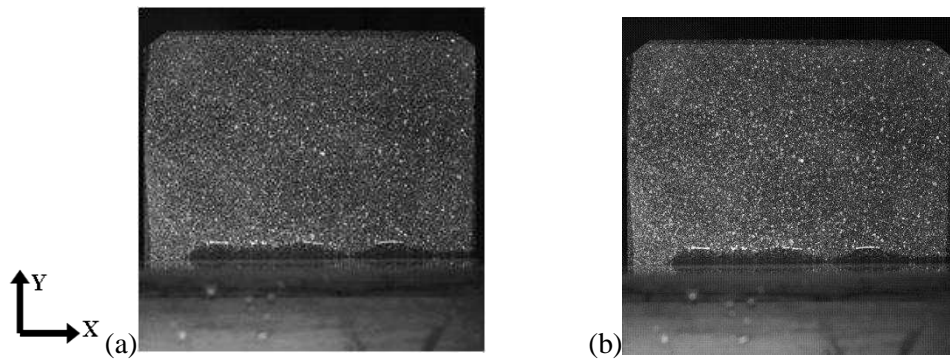


Figure 2-17 : Image de référence (a) et image déformée (b) par une dilatation de 1 pixel environ.

On définit une zone d'analyse comme celle représentée par la figure 2-18 et on adopte des conditions d'imagerie et de traitement représentatives de celle de l'essai réel. Les cartes de déplacements et de déformations montrent une dilatation de l'image (Figures 2-18 et 2-19). Sur les cartes de déformations, on observe l'apparition de bandes de déformation (ou « moirés ») qui découlent de la périodicité de la courbe d'erreur systématique, comme explicité précédemment.

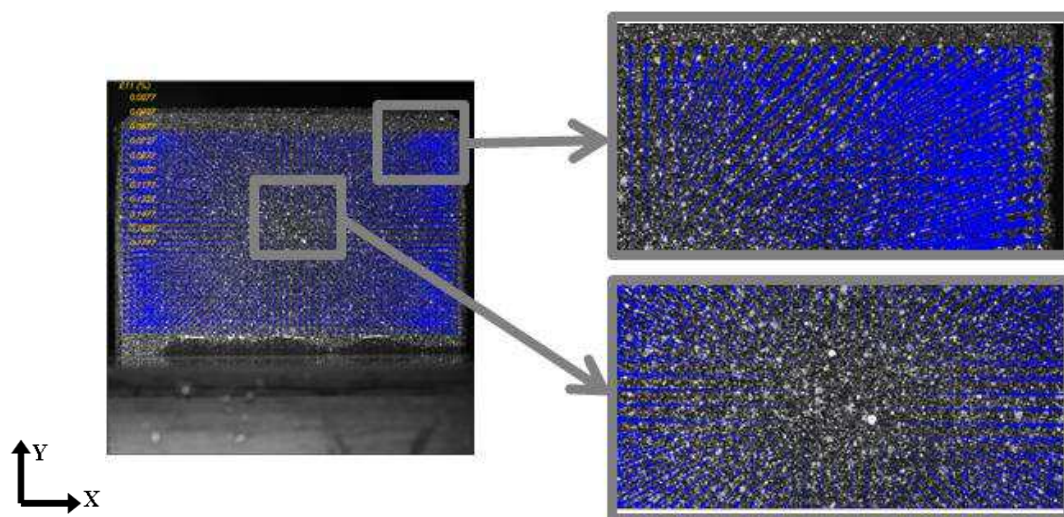


Figure 2-18 : Carte de déplacements, dilatation de l'éprouvette.

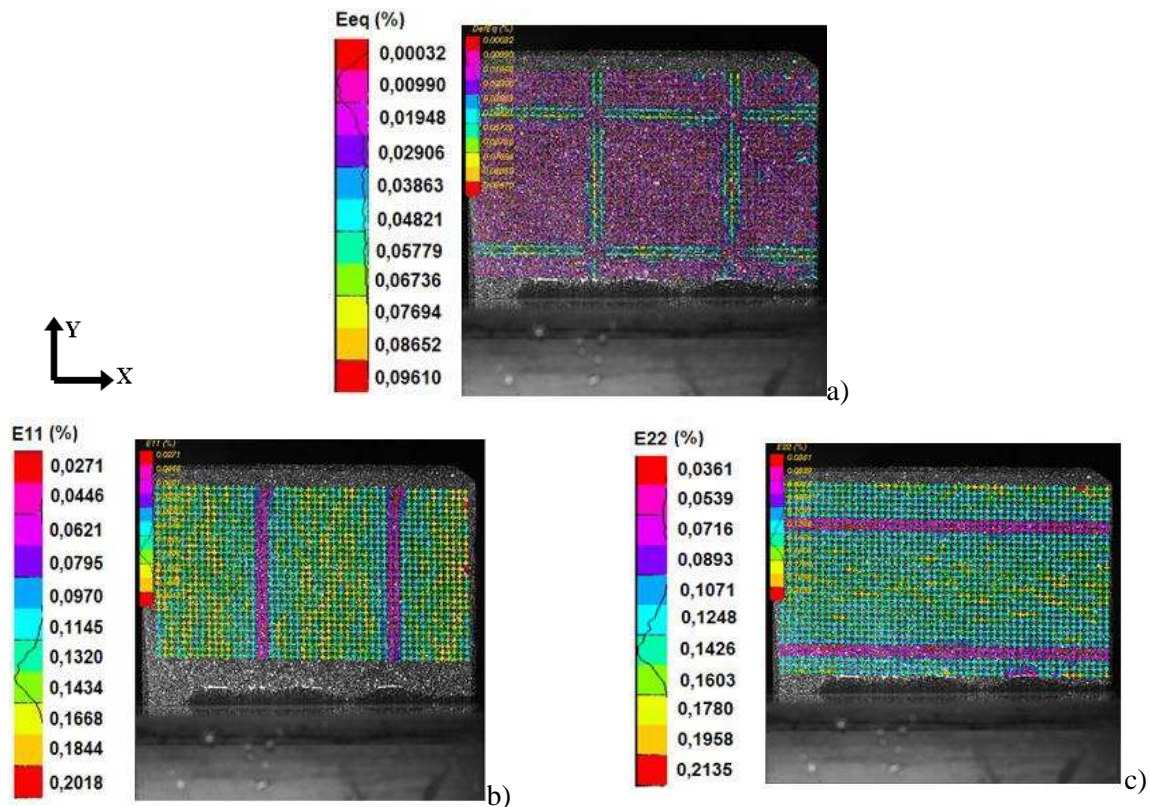


Figure 2-19 : Cartographie des déformations, (a) déformations équivalentes au sens de Von Mises E_{eq} , (b) dans la direction x, E_{11} ou ϵ_{xx} , (c) dans la direction y, E_{22} ou ϵ_{yy} , lors d'une dilatation d'environ 1 pixel.

Le logiciel CMV calcule les erreurs systématiques et aléatoires associées à la mesure de déplacement de l'image déformée, en comparant chaque déplacement mesuré à la transformation homogène moyenne. Les courbes d'erreurs des déplacements dans les directions x et y sont représentées dans la figure 2-20 : erreur systématique à gauche (courbe « en S ») et erreur aléatoire à droite. L'amplitude maximale de l'erreur systématique est obtenue pour un déplacement proche d'une valeur entière de pixel (environ 0,04 pixel), alors que l'erreur aléatoire est de l'ordre de 0,015 pixel. Ce résultat s'explique dans le cas de cette étude par la qualité du mouchetis, probablement légèrement trop fin par rapport à la résolution d'image.

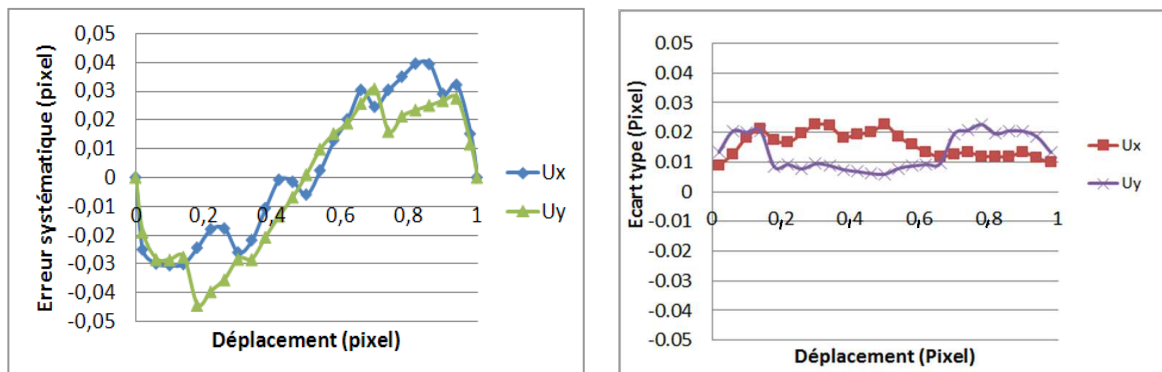


Figure 2-20 : Détermination des erreurs systématiques (à gauche) et aléatoires (à droite) pour le cas présenté en exemple pour des valeurs fractionnaires de pixel.

L'erreur sur la mesure du champ de déplacement se transmet à l'incertitude sur le calcul du gradient de transformation F . L'impact des incertitudes peut être minimisé en choisissant une taille de grille ou un schéma d'intégration adapté (Doumalin, 2000).

L'évaluation des erreurs systématiques et aléatoires obtenues par la méthode décrite précédemment, permet ensuite de déterminer la précision de mesure en déformation, considérant la base de mesure et le schéma d'intégration choisis. Dans le cas des études menées avec le schéma d'intégration 2 et notant a le pas de la grille en pixels, l'écart-type de l'erreur sur les déformations induites par les erreurs aléatoires sur le déplacement est de l'ordre de 0,015 % (Allais et al, 1994 ; Doumalin 2000, annexe A), soit notablement inférieure à 10^{-3} (environ 0,07 %) pour un pas de 20 pixels. Les artefacts (bandes de moiré) induites par les erreurs systématiques ont une amplitude comparable, comme en attestent les fonctions de distribution des déformations apparentes présentées en figure 2.19.

Ces incertitudes de mesure en déformation restent faibles au regard des déformations à mesurer dans les assemblages étudiés, ce qui permet de valider a priori les mesures réalisées.

2.3.2 Analyse de champs de déformation sur les essais Push-Out

Des mesures de déformation par corrélation d'images numériques ont été réalisées sur plusieurs corps d'épreuve lors des essais Push-Out.

La mise en place du dispositif de mesure est simple dans le cas d'un essai mécanique plan. La face observée de l'échantillon est recouverte de mouchetis de peinture mate noire et blanche. L'éclairage est réalisé à l'aide de deux sources lumineuses posées latéralement afin de limiter la saturation dans le blanc liée à la brillance et d'assurer son homogénéité. La caméra est fixée sur un pied stable, et reliée à un système d'acquisition. Toutefois, nous ne pouvons pas assurer que le mouvement hors plan soit nul (effet poisson). Nous avons vérifié néanmoins que celui-ci est négligeable devant les déformations de l'éprouvette induites par le chargement mécanique.

Le dispositif de mesure est présenté en figure 2-21.

La technique de corrélation d'images est utilisée pour ces essais dans le but de détecter les effets indésirables qui pourraient être liés à une asymétrie de l'échantillon, à une faiblesse dans le bois, ou à des contraintes de traction aux bords des interfaces.

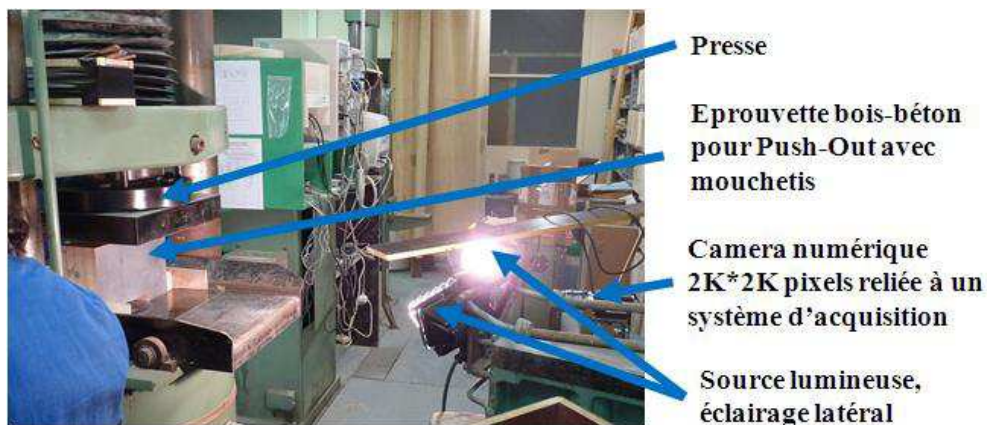


Figure 2-21 : Essais Push-Out pour analyse d'images.

2.3.3 Utilisation de la technique pour les essais de chargement hydrique

2.3.3.1 Observation de la surface entière de l'éprouvette (champ macroscopique)

La corrélation d'images est utilisée pour les tests d'imbibition et pour les tests de chargement sous 97 % d'humidité relative, pour lesquels on fera une observation bidimensionnelle en surface dans le plan (XY) ou (RT) si on se place dans le repère du bois. Le champ de l'image sera égal à la taille de l'échantillon soit 100 mm environ (Figure 2-22).

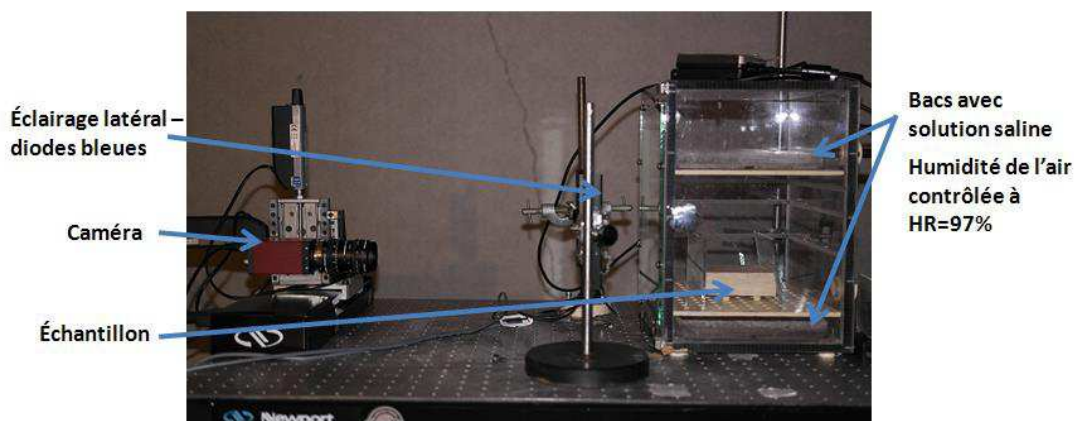


Figure 2-22 : Montage essais de corrélation d'images pour les tests de chargement sous HR=97 %.

La diffusion de l'eau dans les matériaux est un phénomène tridimensionnel. Ainsi, l'utilisation de cette technique de mesure pour les essais de chargement hydrique nécessite une mise au point spécifique que l'on présentera au chapitre 4. La validité de la technique sera montrée grâce à des outils expérimentaux permettant de localiser l'eau dans les échantillons, tels que la gammadensimétrie et l'IRM (les deux techniques sont plus précisément expliquées dans les annexes 1 et 2).

2.3.3.2 Observation de l'interface avec un champ de 1 cm

Une étude approfondie permettra d'identifier précisément le comportement à l'interface de la structure sous humidité relative élevée, à l'échelle de l'interface. Dans ce cas, le champ observé est de 10 mm. Un système motorisé permettant de balayer des zones réduites autour de l'interface a donc été mis en place (voir le système de platines motorisées à gauche de la figure 2-22). Ce système est piloté sous Labview (programme « maison » réalisé par D. Cintra, laboratoire Navier) et permet de réaliser une série d'images prises à échéances fixes (toutes les quatre heures) pendant toute la durée de l'essai de sollicitation hydrique (entre 15 à 30 jours selon l'essai).

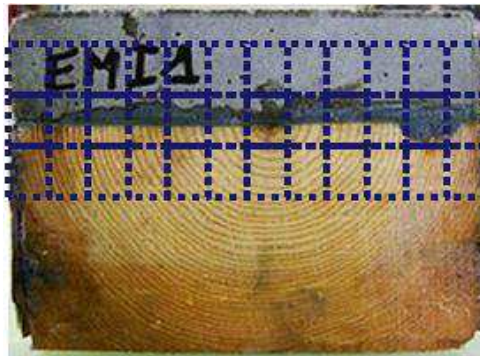


Figure 2-23 : Champs balayés au niveau de l'interface grâce au programme de pilotage de la caméra.

2.3.4 Récapitulatif des essais de corrélation d'images numériques

Pour résumer, la technique de corrélation DIC est utilisée sur chacune des séries d'essais réalisés pendant les travaux de thèse :

- (1) sur certains tests des essais de cisaillement pour vérifier les biais introduits par l'essai de type Push-Out sur le comportement en cisaillement ;
- (2) sur l'ensemble des essais de chargement hydrique. La DIC est un élément de base dans l'analyse et l'exploitation des tests de sollicitation hydrique réalisés sur les assemblages collés bois-béton au laboratoire Navier. L'analyse a été réalisée à deux échelles. Sur l'ensemble de l'échantillon avec un champ de 100 mm*100 mm puis à l'échelle de l'interface (10 mm*10 mm).

Le tableau 2-9 décrit les caractéristiques techniques de la camera et des images pour chaque type d'essai. L'acquisition des images se fait à l'aide d'une caméra CDD de marque AVT Pike F-421B avec un capteur dont la taille des pixels est 7,4 μm . Les optiques sont de marque Schneider Kreuznach (système Macro Schneider, avec bague de mise au point UNIFOC 12, tubes allonges, adaptateur pour monture C et objectif APO Componon de focale 60 mm et d'ouverture 1:4).

Tableau 2-9 : Caractéristiques des images.

	Essais Push-Out	Essais de chargement hydrique	
Taille du champ (mm)	320 x 320	100 x 100	10 x 10
Taille des images (pixels)	2048 x 2048s	2048 x 2048	2048 x 2048
Codage de l'image (bits)	8	8	8
Logiciel utilisé pour l'acquisition des images	Smartview	Smartview	Programme labview
Optique utilisée (mm)	60	60	60
Taille des éprouvettes (mm)	300 x 220	Bois seul 90 x 30 Bois-béton 90 x 45 – 50	
Représentation réelle d'un pixel ($\mu\text{m}/\text{pixel}$)	150	50	5

3 Essais Push-Out sur assemblages collés bois-béton

Les travaux présentés dans ce chapitre ont pour but d'évaluer les propriétés d'adhérence de l'assemblage collé bois-béton, et l'effet de l'humidité sur ces propriétés par l'essai de cisaillement Push-Out.

La première partie de ce chapitre présente des travaux menés au laboratoire d'Autun, antérieurement aux travaux de thèse, portant sur la mise au point et le dimensionnement de l'essai Push-Out et sur les premiers résultats sur le comportement en cisaillement de l'assemblage. La deuxième partie a pour but d'évaluer l'effet des propriétés des colles sur le comportement en cisaillement de l'assemblage et l'effet de l'humidité sur les propriétés d'adhérence de ces colles. Pour cela, trois types de résines structurales dont les modules élastiques varient de 10 à 1200 MPa ont été testés par les essais Push-Out sur des éprouvettes bois-béton sans et avec vieillissement hydrique.

L'ensemble de ces travaux a été mené au Laboratoire Départemental d'Autun.

3.1 Mise au point de l'essai Push-Out

L'essai Push-Out est étudié au laboratoire Navier depuis 2009 pour caractériser les propriétés d'adhérence de l'assemblage collé bois-béton (voir étude théorique §3.1.1). La mise au point de cet essai pour les assemblages collés bois-béton s'est faite en collaboration avec le laboratoire DL d'Autun (Chataigner et al., 2011). Les travaux effectués au DL d'Autun ont permis de dimensionner les corps d'épreuve via notamment la théorie d'O. Volkersen et de mettre au point le protocole d'essai.

3.1.1 Dimensionnement des éprouvettes, étude théorique

3.1.1.1 Longueur d'ancrage

L'objectif de l'essai Push-Out est d'obtenir un mode de rupture par cisaillement de l'assemblage. Afin d'éviter la rupture d'un des deux adhérents par compression, il est nécessaire de travailler avec des éprouvettes de section suffisante, ceci en augmentant la capacité en compression de l'éprouvette. Le bois utilisé est le lamellé-collé en douglas classe GL24 dont la résistance à la compression est de l'ordre de 24 MPa. Le BFUP a une résistance en compression moyenne bien plus importante déterminée à 174 MPa. Il a donc été décidé d'utiliser le bois en élément double, en le plaçant aux extrémités de l'éprouvette et le BFUP en élément simple central.

Il est possible, par la théorie d'O. Volkersen, (Volkersen, 1938) de déterminer analytiquement la longueur d'ancrage élastique par collage. La théorie d'O. Volkersen repose sur l'analyse de l'état de contraintes dans un joint à simple recouvrement⁵, en considérant que l'adhésif et les substrats sont parfaitement élastiques et isotropes et en négligeant les contraintes de cisaillement dues à la flexion des substrats. Elle donne une relation simple entre la longueur d'ancrage L_e , les modules élastiques en traction des matériaux et la raideur de la colle (Équation 3-1).

⁵ Dans le cas des essais Push-Out bois-béton-bois, on ne considérera ici qu'une demi-éprouvette (bois-1/2 béton) pour pouvoir prendre en compte un simple recouvrement.

$$3-1 : \quad L_c = \frac{1}{\lambda} \left[\left(\frac{1}{1-Ksi} \right) * \left(KsiM + \sqrt{1 + Ksi^2(M^2 - 1)} \right) \right]$$

$$\text{Avec } \lambda = \sqrt{\frac{G_c}{e_c} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} ; M = \text{Min} \left(\frac{E_2 e_2}{E_1 e_1} ; \frac{E_1 e_1}{E_2 e_2} \right),$$

E_1, E_2 : représentent respectivement les modules élastiques axiaux du premier et du second adhérent, ici 10 GPa pour le bois (adhérent 1) et 58 GPa pour le BFUP (adhérent 2),

e_1, e_2 sont respectivement les épaisseurs des adhérents 1 et 2,

G_c est le module de cisaillement élastique de l'adhésif,

e_c , l'épaisseur de l'adhésif,

et Ksi , un facteur d'efficacité qui représente la quantité d'effort transmise sur la longueur L_c .

On peut tracer l'évolution de la longueur d'ancrage élastique selon la théorie d'O. Volkersen en fonction de la raideur de la résine et du facteur d'efficacité Ksi (Figure 3-1a). Les épaisseurs des blocs de bois et de béton sont fixées à 100 mm, et on considère que l'épaisseur de la colle est de 1 mm. On souhaite transférer 90 % de la charge maximale lors de l'essai. Si on se reporte sur la courbe représentée sur la figure 3-1, pour des résines structurales de type époxy, dont le module élastique est d'environ 5000 MPa, la longueur de collage, doit être de 180 mm (Figure 3-1b).

Dans le cas de résines plus souples, la longueur de collage devrait être plus grande. Cependant pour des raisons pratiques (taille du corps d'épreuve), celle-ci sera maintenue identique pour tous les essais.

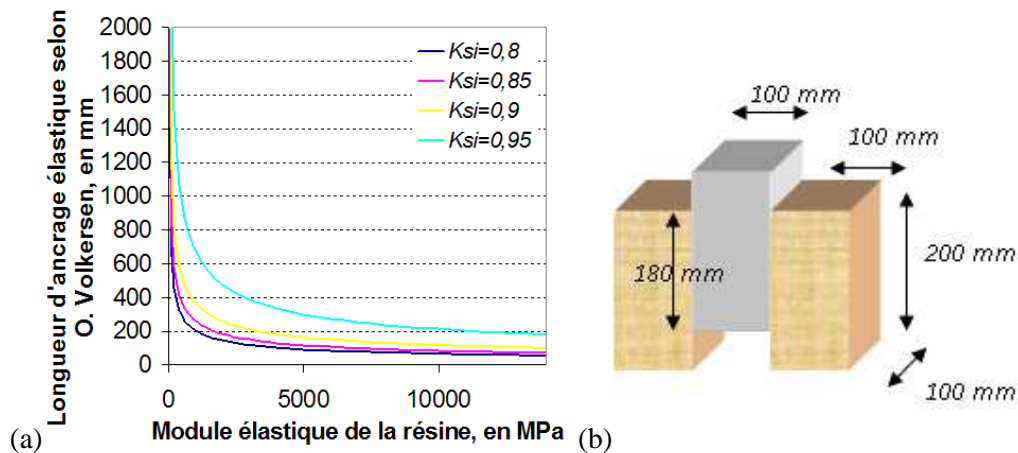


Figure 3-1 : (a) Longueur d'ancrage élastique d'O. Volkersen (Volkersen 1938) en fonction de la raideur de la colle (colle époxy) et du facteur d'efficacité Ksi . (b) schéma des éprouvettes Push-Out.

3.1.1.2 Répartition des contraintes le long du joint de colle

Le module élastique E de la colle à une grande influence sur le comportement en cisaillement d'un assemblage collé. On peut, par la théorie élastique d'O. Volkersen approximer les profils de cisaillement appliqués le long des interfaces de l'éprouvette Push-Out pendant l'essai (Figure 3-2). L'analyse montre que plus le module d'Young est élevé, plus les contraintes de cisaillement sont concentrées aux bords des interfaces. À noter que selon cette théorie, les contraintes de cisaillement sont plus élevées en bas de l'échantillon en comparaison avec celles déterminées en haut de l'échantillon (facteur 2) pour les colles

les plus raides. Au contraire, pour un module d'élasticité faible (10 à 200 MPa), les contraintes sont constantes le long de l'interface.

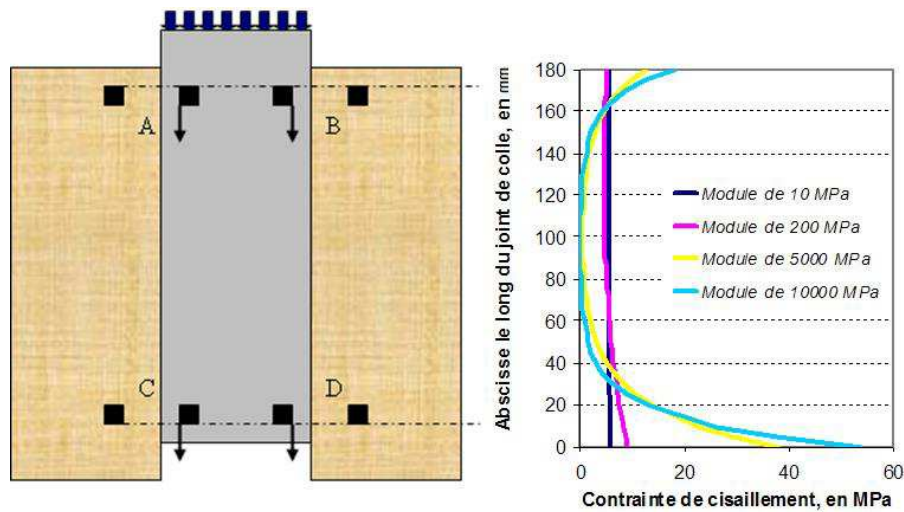


Figure 3-2 : Schéma de l'éprouvette Push-Out, et profils de cisaillement le long du joint de colle obtenus par la théorie élastique d'O. Volkersen pour quatre adhésifs ayant des modules élastiques différents et pour la longueur de collage de 180 mm.

3.1.1.3 Application à une structure réelle (poutre mixte bois-béton collée)

Dans ce paragraphe, on souhaite évaluer l'influence du module d'élasticité de la colle sur le comportement élastique d'une poutre mixte bois-béton collée. Elle peut être estimée par une modélisation numérique simple aux éléments finis.

Par exemple, une poutre mixte bois-béton de longueur 10 m et de largeur 240 mm a été étudiée et soumise à une flexion quatre points (Figure 3-3b). La charge appliquée en chaque point de charge est de 50 tonnes. Le calcul EF est simplifié, il est réalisé en 2D sous l'hypothèse de déformations planes. L'élément béton a une épaisseur de 170 mm, l'élément en bois a une épaisseur de 600 mm, et la couche de colle une épaisseur de 2 mm (Figure 3-3a). Les interfaces bois-colle et béton-colle sont supposées parfaites. Les trois matériaux sont considérés élastiques isotropes. On s'intéresse dans cette étude à l'influence du module élastique de la colle sur l'évolution de la flèche de la poutre en fonction du module élastique de l'adhésif (Figure 3-4).

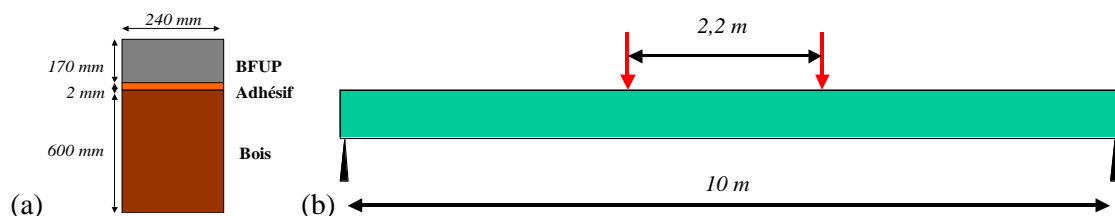


Figure 3-3 : Section de la poutre mixte étudiée b) Schéma du chargement.

On remarque que la flèche de la structure mixte est très peu affectée pour des modules élastiques de résine compris entre 200 et 10000 MPa (plage des modules de résines structurales étudiés dans le cadre de la thèse). Lors de cette étude, une analyse des champs de contrainte de cisaillement et d'arrachement au milieu du joint de colle a permis de vérifier que les niveaux de contrainte étaient identiques pour les trois adhésifs de raideur 200, 5000 et 10000 MPa. Si on ne prend en compte que le comportement en flexion de la poutre, il existe donc une marge de manœuvre importante pour le concepteur portant sur le choix de l'adhésif utilisé.

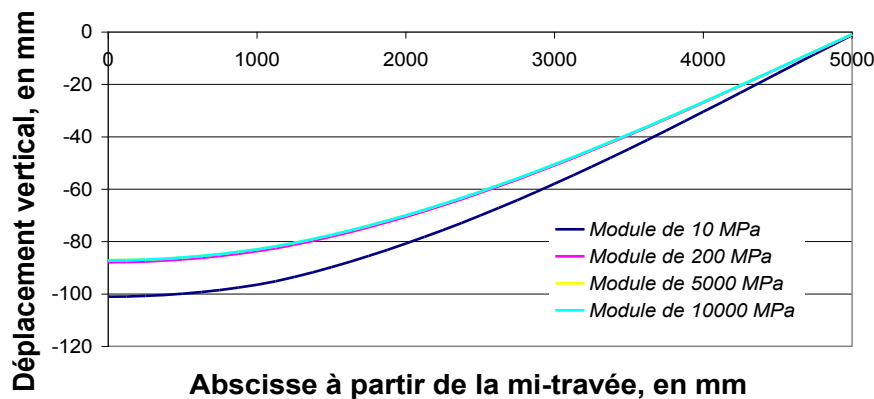


Figure 3-4 : Déformée de la moitié de la poutre à partir de la mi-travée en fonction du module de l'adhésif utilisé.

L'étude présentée dans ce paragraphe ne prend pas en compte le fait que les propriétés des résines utilisées dépendent des conditions thermo-hydriques et peuvent évoluer dans le temps (Benzarti et al., 2011). Ces résultats justifient le besoin d'évaluer l'effet d'un vieillissement hydrique sur le comportement en cisaillement des essais Push-Out.

Aussi, le module d'élasticité de l'adhésif peut avoir un effet sur le comportement de la structure soumise à des chargements hydriques variables. Les variations volumiques du bois sous chargement hydrique induisent des contraintes au niveau de l'interface qui peuvent varier selon la valeur du module élastique de la colle (chapitres 4 et 5).

3.1.2 Protocole expérimental et exploitation de l'essai

Les éprouvettes sont instrumentées pour pouvoir évaluer les déplacements locaux et vérifier ainsi la répartition des efforts de cisaillement. Quatre capteurs de déplacements qui mesurent les glissements locaux sont fixés sur des supports métalliques collés en surface sur l'assemblage, proche des interfaces (Figure 3-5a). Les positions des pastilles supports des éléments en acier sont relevées pour chaque éprouvette avant chaque essai. Les capteurs utilisés sont des capteurs de type LVDT, et ont une course de +/- 1 mm. Les mesures sont enregistrées à une fréquence de 10 Hz.

Les essais sont réalisés sur une presse de compression de capacité 1000 kN. Une précharge de l'échantillon est effectuée jusqu'à 20 kN, puis une rampe de chargement en effort est appliquée jusqu'à 30 kN (à une vitesse de 100 N/s). Après un maintien de cette charge pendant 60 s, une seconde rampe de chargement est appliquée jusqu'à rupture à une vitesse de 500 N/s. Le mouvement vertical de l'éprouvette en pied est bloqué par des cales en bois afin de limiter les efforts de clivage en bout de joint collé (efforts d'arrachement, Figure 3.5b).

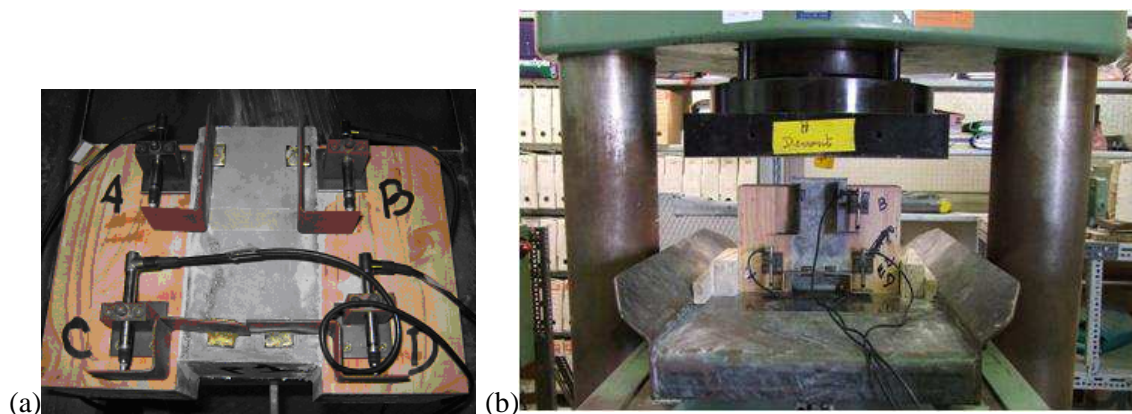


Figure 3-5 : (a) Photo d'une éprouvette Push-Out instrumentée (b) photo du positionnement de l'éprouvette sous la presse avec présence des cales.

Pour l'exploitation de ces essais, nous nous intéressons à deux résultats :

- le mode de rupture : celle-ci peut intervenir soit dans l'un des adhérents (rupture cohésive), soit à l'interface (rupture adhésive) ;
- la capacité maximale de l'assemblage : elle est souvent liée à la capacité ultime de l'élément dit « faible » dans lequel la rupture est intervenue. L'ensemble des matériaux influence cependant le profil des champs de contrainte, et il est donc nécessaire de les prendre en compte lors de l'exploitation des essais.

3.1.3 Résultats de la série préliminaire (série 0, colle époxy)

La série d'essais que nous présentons dans ce paragraphe provient de travaux effectués antérieurement aux travaux de la thèse dans le cadre de recherches menées à l'IFSTTAR (opération de recherche 11R096) autour des assemblages mixtes bois-béton collés (Chataigner, 2009). Celle-ci a permis la validation de l'utilisation de l'essai d'adhérence Push-Out pour l'étude du comportement de l'assemblage.

3.1.3.1 Protocole de fabrication des éprouvettes

Les surfaces des deux adhérents sont poncées au disque diamanté pour les éléments en BFUP après 28 jours de cure et au papier de verre pour le bois. Les surfaces sont ensuite dépoussiérées et dégraissées conformément aux recommandations de la fiche technique de la résine utilisée. La résine est appliquée sur les deux éléments à encoller. Les deux adhérents sont assemblés dans un moule afin d'assurer une bonne

planéité des surfaces d'appui et le parallélisme des blocs (Figure 3-6). La pression entre les éléments est assurée par un serre-joint qui est laissé en place pendant le temps de polymérisation de la résine.

Avant la réalisation des essais Push-Out, la base des échantillons est polie afin d'assurer un appui symétrique convenable des éléments en bois. La colle utilisée pour assembler les deux matériaux est une colle de type époxy (Sikadur 330) dont l'usage préconise l'application d'un primaire d'accrochage sur la face à encoller du matériau bois. Les deux échantillons avec et sans primaire ont donc été étudiés. Au total six échantillons ont été fabriqués :

- trois échantillons sans primaire nommés SP1, SP2 et SP3 ;
- trois échantillons avec primaire, P1, P2 et P3.



Figure 3-6 : Fabrication des échantillons Push-Out - série préliminaire (série 0, (Chataignier 2009)).

3.1.3.2 Résultats expérimentaux

Le tableau 3-1 résume les modes de ruptures observés et les capacités ultimes pour chacun des échantillons testés.

Deux modes de ruptures ont été observés : dans le bois ou dans le béton proche de l'interface (Figures 3-7 et 3-8). Certains échantillons n'ont rompu que d'un côté, ce qui montre une asymétrie de l'essai, induite par une mauvaise planéité des échantillons.

On explique une moyenne plus faible et une dispersion plus importante des capacités ultimes pour les essais sans primaire par le fait que deux échantillons n'ont rompu que dans un des deux adhérents. Ceci ne permet pas de conclure quant à l'influence du primaire d'accrochage sur la résistance en cisaillement de l'assemblage.

En revanche, la dispersion importante des capacités pour l'ensemble des échantillons est liée à la dispersion de la résistance du matériau bois. Les essais ont montré que la présence de nœuds et surtout l'orientation des cernes du bois par rapport au plan de collage ont une influence sur le mode de rupture observé. En effet, le bois présente un point faible en cisaillement et semble rompre en priorité entre les cernes, comme on peut l'observer sur les échantillons P2 et P3 (Figure 3-7). Pour augmenter la capacité de l'assemblage, il convient donc de positionner les cernes du bois perpendiculairement au plan de collage.

Tableau 3-1 : Modes de ruptures et capacités ultimes, essais préliminaires (série 0).

Échantillon	Mode de rupture	Capacité ultime (kN)	Moyenne (kN)	Écart type
P1	- Gauche : 70 % béton proche de l'interface, 30 % dans le bois proche de l'interface	245	277	14 %
	- Droite : 100 % bois			
P2	- Gauche : 100 % bois	320		
	- Droite : principalement dans le bois			
P3	- Gauche : 100 % dans le bois	266		
	- Droite : 100 % dans le bois			
SP1	- Gauche : principalement dans le béton	220		
	- Droite : 70 % dans le bois, 30 % dans le béton			
SP2	- Asymétrie, rupture d'un côté, principalement dans le béton proche de l'interface	170	220	23 %
SP3	- Asymétrie, rupture d'un côté, principalement dans le bois	269		



Figure 3-7 : Faciès de rupture des échantillons avec primaire (échantillons P1, P2, P3).



Figure 3-8 : Faciès de rupture des échantillons sans primaire (échantillons SP1, SP2, SP3).

L'exploitation des résultats par instrumentation permet de vérifier la symétrie de l'essai. Celle-ci coïncide avec les modes de rupture observés. Pour exemple, les courbes de déplacements en fonction de l'effort aux points A, B, C et D comme représentés par la figure 3-2a des échantillons SP2 et P2 montrent bien une asymétrie importante des déplacements de l'échantillon SP2 et une bonne symétrie pour l'échantillon P2 (Figures 3-7a et 3-7b). On notera aussi que les déplacements des points B et D (en haut de l'échantillon) sont moins importants qu'aux points A et C (en bas de l'échantillon), ce qui est en concordance avec la théorie élastique de transfert des efforts en cisaillement d'O. Volkersen (§ 3.1.1.2).

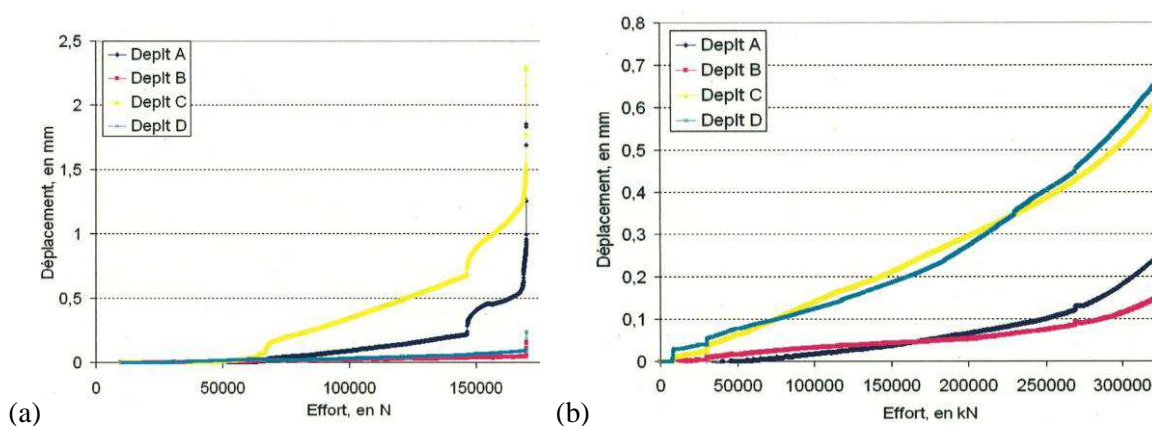


Figure 3-9 : Déplacements au niveau du joint de colle (échantillons SP2 et P2).

Pour conclure, l'essai apparaît pertinent pour l'étude de la capacité maximale de l'assemblage et des modes de rupture, notamment pour l'étude du choix de la colle et l'analyse des propriétés d'adhérence. Il convient néanmoins d'améliorer le protocole de fabrication pour assurer une planéité de l'assemblage, et un essai le plus symétrique possible. Pour cela, une ponceuse circulaire juste avant l'essai a été utilisée afin de poncer les pieds de l'échantillon pour la série d'essais réalisée dans le cadre de la thèse (série 1). On continuera, pour limiter les efforts d'arrachement, de bloquer les déplacements des pieds de l'échantillon.

3.2 Choix de la colle (série 1, trois types de colles)

Cette série d'essais a pour but d'étudier l'influence des propriétés de trois types de colles structurales sur le comportement en cisaillement de l'assemblage et d'évaluer les effets de l'humidité sur ces propriétés afin de choisir la colle la plus performante pour les assemblages collés bois-béton.

3.2.1 Réalisation des assemblages collés

Comme précisé au chapitre 2, paragraphe 2.2, 20 échantillons ont été testés pour le choix de la colle, soient cinq pour chacune des quatre colles suivantes : la Sikadur 330 et la Sikadur 30 (deux résines époxy), la Sikaforce 7750L15 (une résine polyuréthane bi-composante), la Sikafast 5215 (une résine acrylique modifiée). On rappelle les propriétés principales des différentes colles utilisées dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Récapitulatif des propriétés des résines testées.

Adhésif	Sikadur 30 (Époxy 1)	Sikadur 330 (Époxy 2)	Acrylique modifiée	Polyuréthane
DPU à 20°C (Durée pratique d'Utilisation) (min)	70	30	5	15
Type de comportement mécanique à court terme	Elastique fragile	Elastique fragile	Elasto-plastique (viscosité importante)	Hyperélastique
Module d'Young élastique en traction, en Mpa	12000	5200	200	10
Allongement à rupture (%)	0,1	0,1	120	200

La méthode de réalisation des assemblages est la même que celle décrite au paragraphe 3-1. Seul le dispositif de maintien utilisé pour assembler les trois blocs est différent (Figure 3-10). Celui-ci a été mis

en place pour permettre une fabrication plus facile et une bonne symétrie de l'assemblage. Les cernes du bois collé ont été orientés, autant que possible, perpendiculairement à l'interface afin de ne pas cisailer au niveau des cernes comme observé lors des essais préliminaires (série 0).

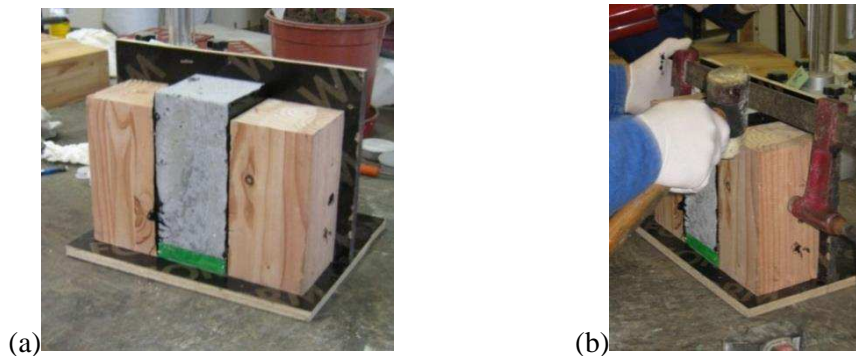


Figure 3-10 : (a) Photo du dispositif de maintien, (b) photo de la mise en place du serre-joint.

Douze échantillons (trois pour chaque colle) ont été stockés en salle ambiante et testés trois mois après la fabrication dans les mêmes conditions que celles décrites précédemment. Les huit échantillons restants, fabriqués dans le but d'étudier l'effet du vieillissement sur les propriétés d'adhérence des résines, ont été stockés en salle de vieillissement selon les schémas décrits par le tableau 3-3.

La salle « piscine » correspond à une salle de conservation dont la température est contrôlée à 20 °C et en raison de la présence de bains d'eau de conservation, l'humidité relative est importante. Après enregistrement de l'humidité de la salle « piscine », on retiendra que l'humidité relative varie fortement avec une HR > 95 % en été, et entre 50 et 95 % en hiver (Figure 3-11).

La salle « ciment » correspond à une salle d'essais à 20 °C et à humidité relative ambiante de 60 %.

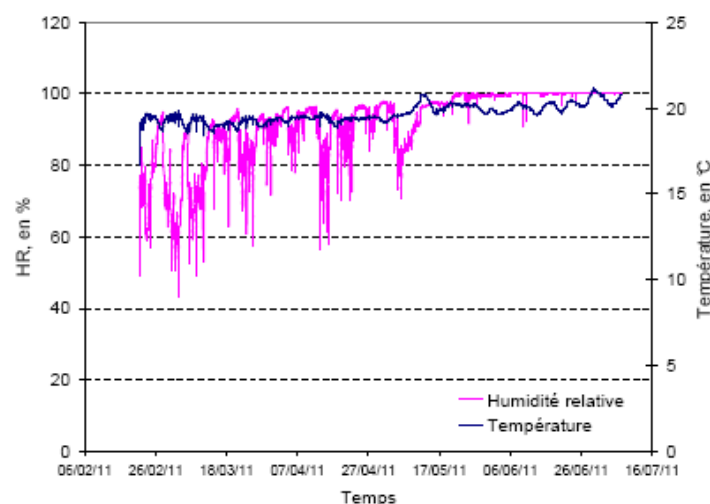


Figure 3-11 : Enregistrement de la température et de l'humidité relative en salle « piscine » entre fin février et juillet 2011.

Tableau 3-3: Récapitulatif des échantillons Push-Out et stockage.

Type de Résine	Résine	Nom de l'échantillon	Stockage
Époxy	Sikadur 330	330-1	3 mois en salle ambiante (pas de vieillissement)
		330-2	
		330-3	
		Bloc 7	Salle « piscine » pendant 1 an
		Bloc-8	Extérieur abrité pendant 1 an
	Sikadur 30	E1	3 mois en salle ambiante (pas de vieillissement)
		E2	
		E3	
		E4	Salle piscine pendant 1 an
		E5	2 semaines salle « piscine », 2 semaines salle « ciment » pendant 1 an
Polyuréthane bi-composant	Sikaforce 7750L15	PU1	3 mois en salle ambiante (pas de vieillissement)
		PU2	
		PU3	
		PU4	Salle piscine pendant 1 an
		PU5	2 semaines salle « piscine », 2 semaines salle « ciment » pendant 1 an
Acrylique Modifiée	Sikafast 5215	AM1	3 mois en salle ambiante (pas de vieillissement)
		AM2	
		AM3	
		AM4	Salle piscine pendant 1 an
		AM5	2 semaines salle « piscine », 2 semaines salle « ciment » pendant 1 an

3.2.2 Résultats expérimentaux

3.2.2.1 Essais avant vieillissement

L'analyse des modes de rupture et de la capacité ultime a permis de conclure quant à la colle la plus efficace en termes de propriété d'adhérence sur l'assemblage collé bois-béton. L'ensemble des résultats, résumés par le tableau 3-4 et les figures 3-12 à 3-15, montrent que :

- les deux plans d'assemblages ont rompu pour la quasi-totalité des éprouvettes. La symétrie de l'essai est mieux maîtrisée que pour les essais préliminaires (série 0). Pour le cas de la Sikadur 30, qui est la résine la plus rigide avec un module de 12000 MPa (contre 5200 pour la Sikadur 330), deux des trois échantillons n'ont rompu que d'un côté, ce qui laisse penser que plus le module de la résine est important, plus l'éprouvette est sensible aux défauts d'alignement ou aux défauts locaux des adhérents ;
- l'adhésion est la plus importante pour les colles époxy. En effet, nous observons pour ces résines une rupture totalement cohésive principalement dans le bois, et légèrement dans le béton de surface avec une contrainte de cisaillement moyenne de plus de 6,5 MPa. Ceci indique que les adhérents (surtout le bois) sont le point faible de l'assemblage, et que la résine n'a pas atteint sa capacité maximale ;

- l'acrylique donne de bons résultats en termes de contrainte de cisaillement moyenne de 4,3 MPa. Pour cette résine, deux modes de rupture sont observables, la rupture cohésive dans le bois (50 %) et adhésive au niveau de l'interface adhésif/bois. L'adhésion bois/acrylique semble être le point faible de l'assemblage ;
- la résine polyuréthane présente des propriétés d'adhésion insuffisantes avec une rupture adhésive de toutes les interfaces, et une contrainte de cisaillement moyenne insuffisante (1,1 MPa) ;
- la dispersion de l'essai semble augmenter avec le module élastique de la colle. Ceci est conforme à la théorie élastique d'O. Volkersen (Figure 3-6) qui montre que plus la colle est rigide, plus les concentrations de contraintes de cisaillement augmentent aux bords bas et haut des interfaces. La sensibilité aux hétérogénéités des matériaux augmentent donc avec le module d'Young de la colle.

Tableau 3-4: Principaux résultats des essais Push-Out pour les quatre adhésifs avant vieillissement.

Échantillon		Capacité ultime (kN)	Mode de rupture	Capacité ultime moyenne (kN)	Dispersion de la capacité ultime (%)	Contrainte de cisaillement moyenne ⁶ (MPa)
Époxy 1 : Sikadur 30	E1	122,9 (pas de blocage des pieds)	30 % béton, 70 % bois	242	43	6,7
	E2	300,9				
	E3	303				
Époxy 2 : Sikadur 330	330-1	182,9	25 % béton, 75 % bois	237	20	6,6
	330-2	257				
	330-3	272,1				
Acrylique	AM1	205	50 % bois, 50 % interface adhésif/bois	177	13,8	4,9
	AM2	165				
	AM3	161				
Polyuréthane	PU1	51,2	50 % interface béton/adhésif, 50 % interface bois/adhésif	41,1 (rupture pendant la précharge)	42	1,1
	PU2	21				
	PU3	51				

⁶ La contrainte de cisaillement moyenne $\bar{\tau}$ est calculée de la manière suivante : $\bar{\tau} = \frac{\overline{F_{max}}}{S}$

où $\overline{F_{max}}$ est la capacité ultime moyenne

et S la surface totale cisailée soit $S = 18 * 10 * 2 \text{ cm}^2$



Figure 3-12 : Photos des éprouvettes E1, E2, et E3 (Sikadur 30) après rupture.



Figure 3-13 : Photos des éprouvettes 330-1, 330-2, et 330-3 (Sikadur 330) après rupture.



Figure 3-14 : Photos des éprouvettes PU1, PU2, et PU3 (polyuréthane) après rupture.



Figure 3-15 : Photos des éprouvettes AM1, AM2, et AM3 (acrylique modifiée) après rupture.

3.2.2.2 Essais après vieillissement

a) Suivis des échantillons au cours du vieillissement

Les masses des échantillons stockés en salle de vieillissement ont été relevées. On peut en déduire une estimation de la teneur en eau moyenne des blocs de bois des échantillons en supposant que la teneur en eau initiale (en milieu ambiant) est de 13 %, et que la prise de masse est essentiellement due à la prise d'eau du bois dans le temps (Figures 3-16 et 3-17). Les variations de teneur en eau mesurées pour les échantillons stockés en salle piscine (E4, AM4, PU4 et bloc7, placés un mois après), ainsi que pour les échantillons alternés salle piscine/salle béton (E5, AM5 et PU5) sont conformes aux variations hygrométriques mesurées en salle piscine. On observe globalement une augmentation de la teneur en eau allant jusqu'à 22 % en période estivale, soit les 60 premiers jours de chargement et après 250 jours (les 30 premiers jours pour bloc 7) et une diminution en période hivernale entre 60 et 250 jours de stockage en salle de vieillissement, expliquée par la mise en route du chauffage.

Les variations de teneurs en eau dans le bois coïncident bien avec les variations saisonnières.

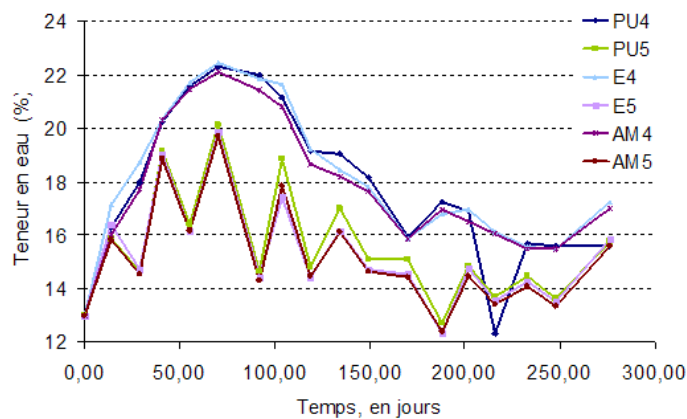


Figure 3-16 : Teneur en eau moyenne des échantillons E4, E5, AM4, AM5, PU4 et PU5 en fonction du temps.

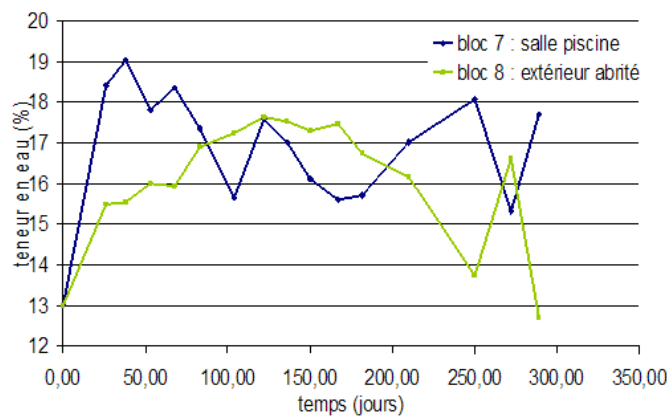


Figure 3-17 : Teneur en eau moyenne des échantillons Bloc7 et Bloc8 en fonction du temps.

b) Résultats expérimentaux

Les résultats des essais Push-Out après vieillissement (Tableau 3-5 et Figures 3-18 à 3-21) montrent que :

- la colle époxy présente les propriétés d'adhésion les plus intéressantes après vieillissement en termes de capacité ultime avec une contrainte moyenne en cisaillement de 4,7 MPa et des ruptures cohésives (Figures 3-18 et 3-19). On notera néanmoins une baisse des propriétés d'adhérence d'environ 30 % en moyenne par rapport au cas non vieilli (Figure 3-22). Étant donné le mode de rupture cohésif, cette baisse d'adhérence s'explique en partie par la baisse des propriétés mécaniques du bois qui est fonction de sa teneur en humidité. En effet, nous n'avons pas attendu que les échantillons retrouvent leur état d'équilibre hygroscopique en milieu ambiant avant de les tester. Si on suppose que l'humidité du bois à 12 % en milieu ambiant est passée à 20 %, on peut évaluer ses propriétés en se basant sur la formule suivante, tirée du *Wood Handbook* (United States Department of Agriculture 1999).

$$3-2 \quad Pr = Pr^{12} * \left(\frac{Pr^{12}}{Pr^g} \right)^{\left(\frac{12-m}{m^p-12} \right)}$$

Avec Pr la propriété à la teneur en humidité voulue m , et Pr^{12} la même propriété à 12 % de teneur en humidité,

Pr^g la même propriété du bois vert

m^p représente l'humidité du bois saturé estimée à 25 % environ.

Les valeurs de Pr^g et m^p sont données pour de nombreuses essences de bois, dont le douglas dans le *Wood Handbook*.

Cette équation permet d'estimer une baisse des propriétés du bois de 22 % environ pour une prise d'humidité de 8 %, soit 2/3 de la perte d'adhérence des essais Push-Out ;

- l'acrylique donne toujours de bons résultats en termes de contrainte de cisaillement moyenne de 3,4 MPa, et les faciès de rupture sont similaires au cas avant vieillissement (Figure 3-20). Comme pour la résine époxy, on notera une baisse de résistance d'environ 30 %, cette fois-ci majoritairement expliquée par une baisse des propriétés d'adhérence de la colle justifiée par les modes de rupture essentiellement adhésifs ;
- la résine polyuréthane présente des propriétés d'adhésion insuffisantes avec une rupture pendant la précharge.

Tableau 3-5 : Principaux résultats des essais Push-Out pour les quatre adhésifs après vieillissement.

Échantillon		Capacité ultime (kN)	Mode de rupture	Capacité ultime moyenne (kN)	Dispersion de la capacité ultime (%)	Contrainte de cisaillement moyenne (MPa)
Époxy 1 : Sikadur 30	E4	181,9	25 % béton, 75 % bois	167,8	24,8	4,7
	E5	114(rupture asymétrique)	50 % béton, 50 % bois			
Époxy2 : Sikadur 330	Bloc7	183,4	95 % béton, 5 % bois			
	Bloc8	191,7	0 % béton, 100 % bois			
Acrylique	AM4	115,7(rupture asymétrique)	10 % bois, 90 % interface adhésif/bois	122,4	7,7	3,4
	AM5	129	50 % bois, 50 % interface adhésif/bois			
Polyuréthane	PU4	0	100 % interface bois/adhésif	14,8		0,41
	PU5	29,6	(rupture pendant précharge)			

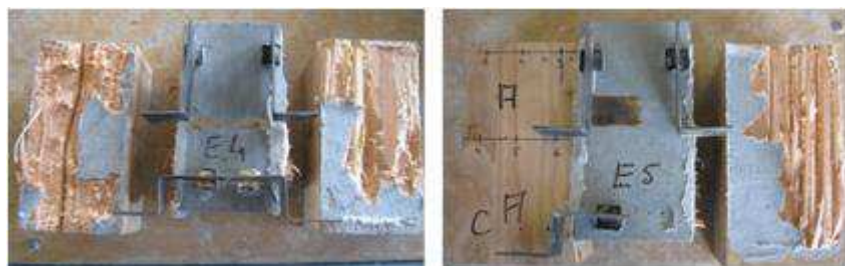


Figure 3-18 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes E4 et E5 après rupture (Époxy – Sikadur 30).



Figure 3-19 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes bloc 7 et bloc 8 après rupture (Époxy – Sikadur 330).



Figure 3-20 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes AM4 et AM5 après rupture (acrylique modifiée).



Figure 3-21 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes PU4 et PU5 après rupture (polyuréthane bi-composante).

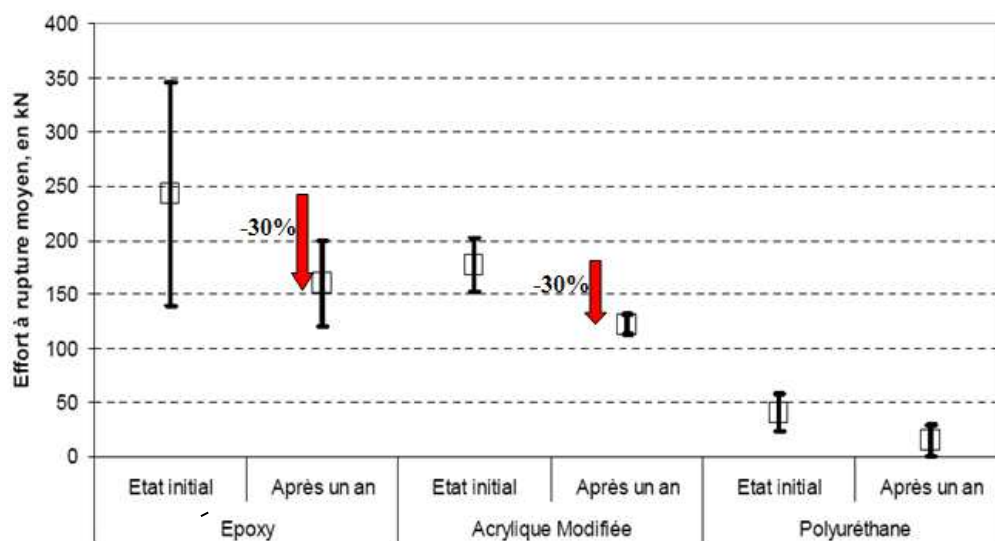


Figure 3-22 : Capacités ultimes moyennes avant vieillissement (état initial) et après un an de vieillissement pour les trois types de colle.

c) Compléments d'étude par analyse d'images numériques

Pour les essais après vieillissement, des mesures de déformation par corrélation d'images numériques ont été réalisées sur les trois corps d'épreuves suivants PU4, AM4 et bloc 8.

Un mouchetis a été appliqué en surface de l'éprouvette. Cette surface est observée par une caméra haute résolution (2024*2024), et les images sont enregistrées à une fréquence de sept images par seconde. L'utilisation de spots a été nécessaire afin d'obtenir un éclairage suffisant.

L'analyse des déformations ε_{xx} pendant l'essai montre l'existence de contraintes d'arrachement aux pieds des éprouvettes, pour les trois types de colles (Figures 3-23a, 3-24a et 3-25a). Celles-ci sont illustrées par des déformations ε_{xx} positives en bas des interfaces (traction) et négatives en haut (compression) pour le cas des résines époxy et acrylique. Pour la résine polyuréthane, le comportement est différent : les déformations ε_{xx} positives démarrent en bas et se propagent rapidement le long de l'interface. Bien que les cales en bois minimisent l'arrachement, elles ne l'annulent pas totalement.

Les cartes de déformations ε_{yy} et ε_{xy} montrent :

- dans le cas de la résine époxy (Figure 3-23b et 3-23c), que plus de la moitié du bloc gauche de bois est sollicité pendant l'essai. Celui-ci subit de la compression, avec des déformations ε_{yy} négatives ($\varepsilon_{yy} = -0,3 \%$) et du cisaillement ($\varepsilon_{xy} = 0,3 \%$). Ce phénomène s'explique par une bonne rigidité de la colle et de bonnes propriétés d'adhérence sur les deux matériaux bois et béton. Les déformations dans le bloc droit sont quasi-nulles car l'essai est asymétrique et la rupture, ici cohésive, n'a eu lieu que d'un côté, dans le bois. On n'observe pas de cisaillement important concentré au niveau des interfaces ;
- dans le cas de la résine acrylique modifiée, les blocs de bois sont aussi sollicités, mais de façon moins importante que pour le cas de la résine époxy (ε_{yy} est de l'ordre $-0,1 \%$) (Figure 3-24b) du fait de la bonne rigidité de la colle. En revanche, l'adhésion de la colle sur les matériaux bois et béton est insuffisante et on observe des déformations de cisaillement concentrées au niveau des interfaces (Figure 3-24c), plus importantes au niveau de l'interface gauche que droite. Cet essai n'est pas symétrique, et la rupture a eu lieu à gauche, au niveau de l'interface bois/colle majoritairement ;
- pour le cas de la colle polyuréthane, le bois n'est pas sollicité, seules des déformations de cisaillement sont visibles au niveau des deux interfaces (Figure 3-25b et 3-25c).

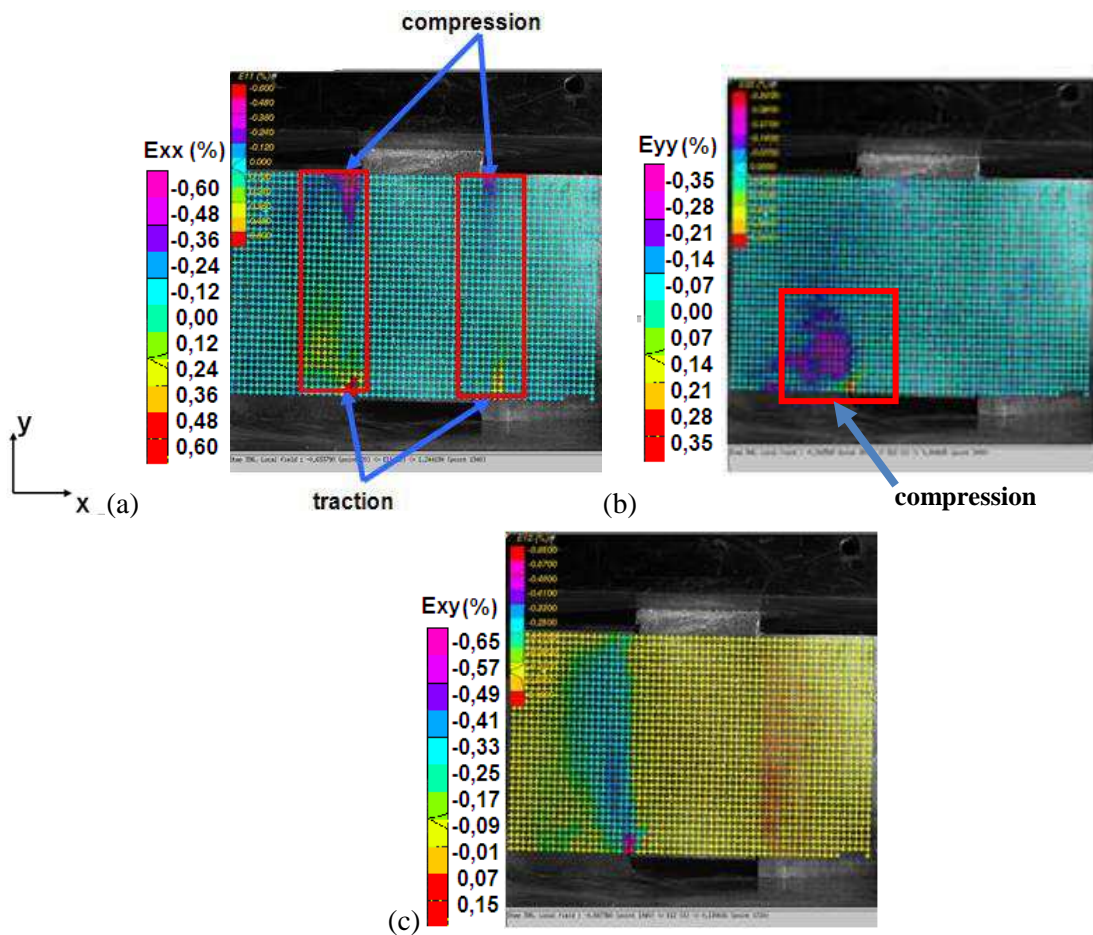


Figure 3-23 : Déformations de l'échantillon bloc7 pendant l'essai juste avant rupture (a) ϵ_{xx} (b) ϵ_{yy} et (c) ϵ_{xy} .

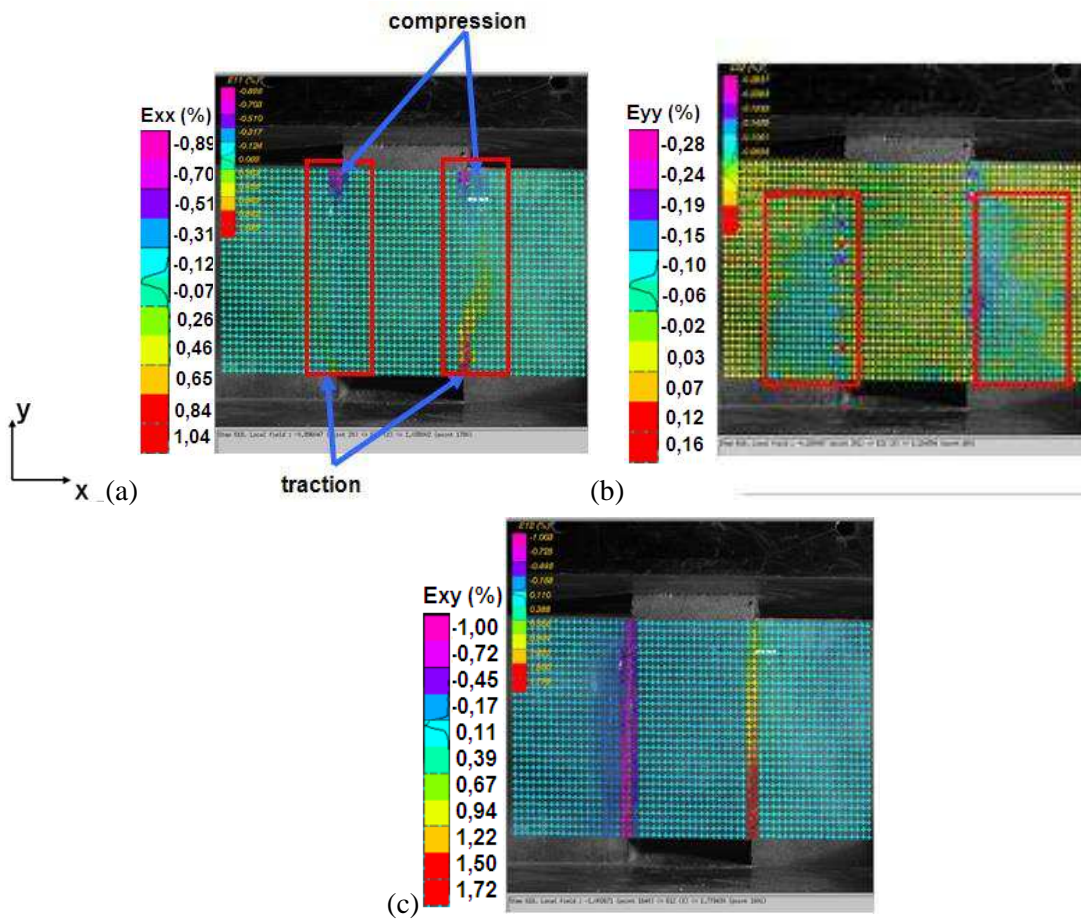


Figure 3-24 : Déformations de l'échantillon AM4 pendant l'essai juste avant rupture (a) ϵ_{xx} (b) ϵ_{yy} et (c) ϵ_{xy} .

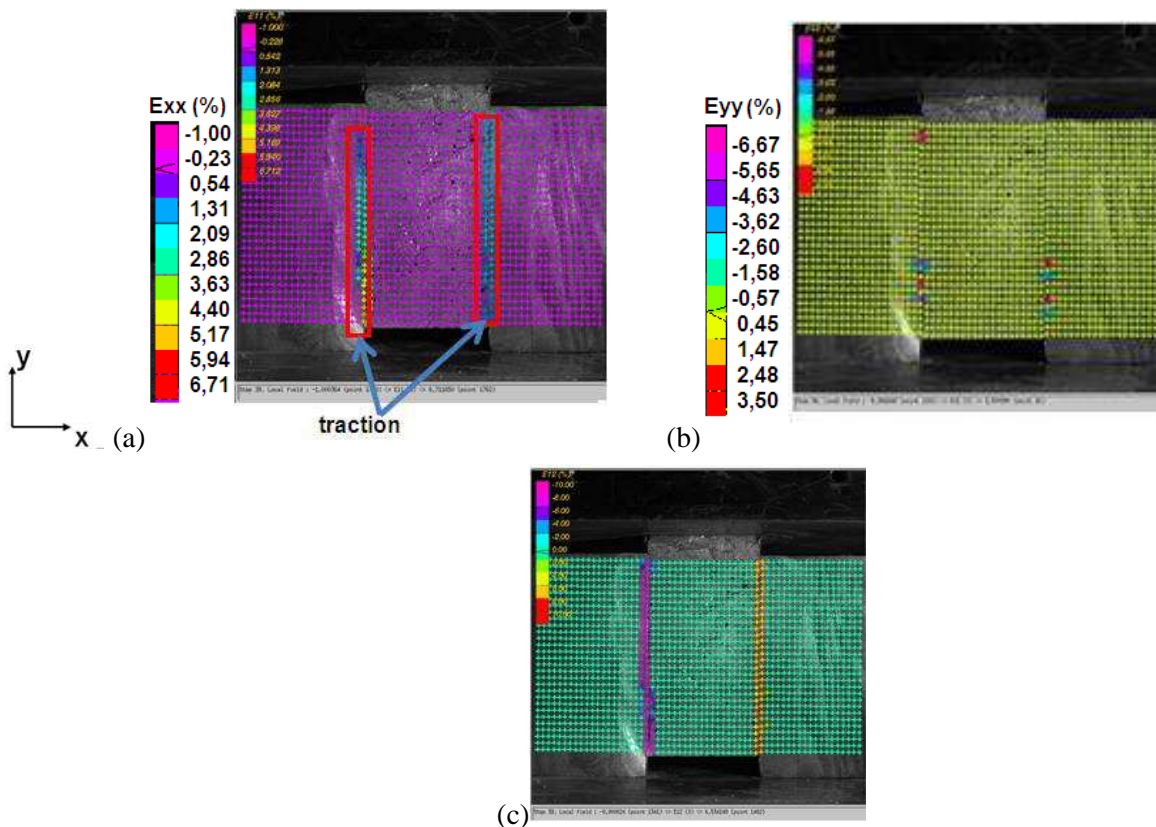


Figure 3-25 : Déformations de l'échantillon PU4 pendant l'essai juste avant rupture (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} .

3.3 Conclusion

Les études menées ont permis de comparer le comportement en cisaillement d'assemblages collés bois-béton pour différentes résines, en conditions standard et en conditions de vieillissement. Le protocole expérimental a été amélioré dans le cadre de la série plus spécifiquement réalisée pendant la thèse.

Dans un premier temps, l'étude a nécessité une mise en place du test Push-Out par une série d'essais préliminaires. L'effet de l'orientation des cernes du bois par rapport au plan de collage sur la capacité de l'assemblage a été mis en évidence. Il convient d'orienter les cernes perpendiculairement au plan de collage pour augmenter la résistance en cisaillement de l'assemblage.

Ensuite, les performances en termes de propriétés d'adhérence ont été évaluées par des mesures classiques d'extensométrie et par des analyses visuelles des faciès de rupture. Les résultats obtenus via la technique de corrélation d'images ont confirmé la complexité des essais de type Push-Out. Pour les échantillons analysés, l'essai n'est pas parfaitement symétrique, cet aspect dépend fortement des défauts locaux des matériaux constituant l'assemblage (notamment le bois) et de la fabrication de l'échantillon. De plus, malgré le blocage des pieds des échantillons, les contraintes d'arrachement au bas des interfaces ne sont pas suffisamment minimisées. Malgré les biais observés, l'ensemble des mesures et observations ont permis de valider ce test pour le choix de la résine.

Concernant le choix de la colle, les essais Push-Out ont permis de valider le choix de la résine époxy pour la suite de la recherche, celle-ci présentant de très bonnes propriétés d'adhésion avec une rupture pour une contrainte moyenne en cisaillement de l'ordre de 5 MPa.

Enfin, les sollicitations hydriques (constantes ou non) font baisser la résistance de l'éprouvette. Nous l'expliquons en partie par la baisse des propriétés du bois induite par la prise d'humidité (cas de la colle époxy). Nous ne pouvons pas conclure sur une chute des performances du collage notamment pour la résine époxy car la rupture est essentiellement cohésive dans le bois.

L'ensemble de ces résultats a motivé la réalisation de nouveaux essais : 14 éprouvettes de type Push-Out, dont les matériaux constitutifs sont le douglas, la résine Époxy Sikadur 32LP et le BFUP ont été réalisées. À noter que le béton a été collé frais sur le bois. Sept éprouvettes, stockées en milieu ambiant, sont à tester 28 jours après la fabrication pour référence. Les sept restantes sont stockées en salle de vieillissement parfaitement contrôlée à une température de 40 °C et une humidité relative supérieure à 95 %. Les premiers résultats sur éprouvettes non vieilles ont montré que l'essai nécessite un travail supplémentaire sur le protocole de fabrication des échantillons Push-Out avec du béton frais (Youssef et al., 2013).

4 Tenue des assemblages bois-béton sous chargement hydrique

Nous présentons dans ce chapitre les essais réalisés sur des petits corps d'épreuve (bois, bois-béton de dimension décimétrique) dont l'objectif est d'évaluer les endommagements potentiels lors de chargements hydriques.

Une première étape de l'étude a consisté à évaluer par un essai en situation hydrique sévère, mais unidirectionnelle, les mécanismes d'endommagement possibles d'un assemblage bois-béton collé au niveau de l'interface. Nous avons mis au point le « test d'imbibition » qui consiste à laisser tremper dans l'eau, pendant un temps d'environ deux semaines, la base de l'échantillon sur une hauteur d'environ 3 à 5 mm. Ces essais n'ont pas pour but de conclure quant à la réalité des phénomènes impliqués dans la tenue sous chargement climatique d'une structure, mais plutôt de fournir des informations sur les mécanismes d'endommagement de l'interface pour orienter le choix de la colle, des conditions de collage et de la géométrie de l'assemblage. Par « choix de la géométrie » nous entendons en particulier l'influence du sens des cernes du bois par rapport au plan de collage sur la tenue de l'assemblage. Au cours de la deuxième étape des travaux, il s'est agi de réaliser des essais de chargement hydrique (transfert bidirectionnel) plus « réalistes » en soumettant des assemblages à une humidité relative de 97 % pendant une durée au minimum de trois semaines.

Nous avons vu au chapitre 1 que les variations dimensionnelles dans le bois sont liées à la diffusion de l'eau au sein du matériau. Dans un assemblage collé bois-béton, les déformations hydriques du bois peuvent avoir un effet défavorable au niveau de l'interface collé du fait de propriétés différenciées entre le béton et le bois. L'utilisation de la technique de corrélation d'images, basée sur une observation en surface de l'échantillon, a pour but de quantifier les déformations dans l'assemblage et d'évaluer précisément, les zones endommagées. Or la technique seule ne permet pas de confirmer que les cartes de déformations obtenues sont représentatives de ce qui se passe au cœur de l'échantillon testé. Il est donc nécessaire, avant toute chose, de valider l'application de cette technique pour les deux types de chargement : « imbibition » et « humidité relative ». C'est ce qui est présenté dans la première partie et qui permettra d'introduire le comportement hydromécanique du bois seul. La deuxième partie portera sur les résultats expérimentaux des assemblages mixtes bois-béton qui permettront de discuter des facteurs qui influent sur la tenue de ces assemblages sous chargements hydriques.

4.1 Déformations libres d'un échantillon de bois, validation de l'essai

Les assemblages testés sous chargements hydriques sont composés : de bois massif d'épicéa ou de douglas, de colle de 1 à 2 mm d'épaisseur et de béton d'environ 20 mm d'épaisseur (mortier ou béton fibré à ultra hautes performances BFUP). Ces échantillons sont soumis soit à un test dit « d'imbibition » durant lequel la base de l'échantillon, donc le bois, est en contact avec de l'eau (Figure 4-1), soit un test « de chargement hydrique » où les parois latérales du corps d'épreuve sont au contact d'une humidité relative de 97 % (Figure 4-2) ⁷. Le protocole expérimental et les différents tests réalisés sont présentés dans le chapitre 2.

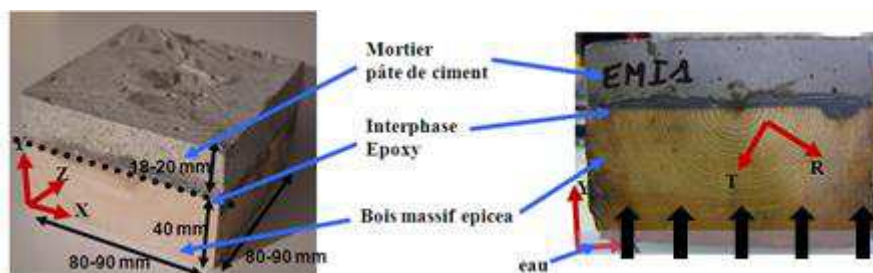


Figure 4-1 : Test d'imbibition sur échantillon de bois massif/mortier collés. Le bois est en contact à la base avec 3 à 5 mm d'eau.

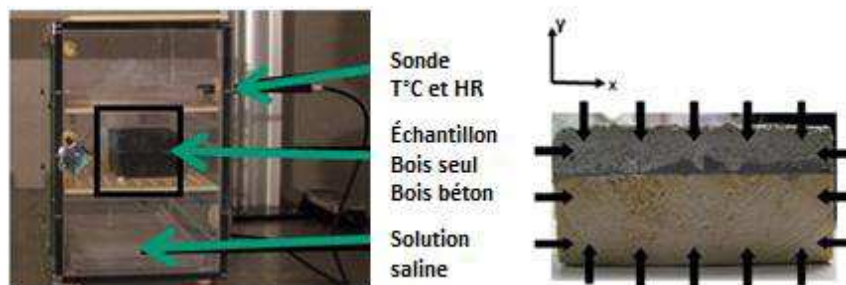


Figure 4-2 : Tests de chargement sous humidité relative H_R sur un échantillon de bois massif/mortier collés.

4.1.1 Validation de la technique DIC pour les tests d'imbibition

Il est important de vérifier préalablement que le champ de déformation de l'échantillon est peu dépendant de l'axe z (sens des fibres), et que son observation sur une face libre (dans le plan XY) de l'échantillon est pertinente pour évaluer si les mesures faites en surface sont représentatives de celles dans tout le volume de l'éprouvette. Pour cela, nous avons réalisé des essais spécifiques sur des échantillons de bois. Ces

⁷ Les axes x , y et z sont toujours dirigés suivant respectivement les directions horizontale-transversale, verticales, et horizontale-longitudinale. Les déformations d'extension sont comptées positivement.

derniers ont été choisis de façon à minimiser les divergences expérimentales liées à la structure du bois. Les cernes du bois étant un facteur important dans l'étude du comportement hydromécanique du bois, nous avons veillé à ce qu'ils présentent un faciès aussi constant que possible (épaisseur et forme) d'un échantillon à l'autre.

4.1.1.1 Mise au point de l'essai

L'analyse par corrélation d'images numériques (Digital Image Correlation DIC) conduit à évaluer la nécessité d'un mouchetis sur la surface observée par la caméra. Celui-ci se pratique à l'aide de bombes de peinture mate noire et blanche. En son absence, l'eau liquide qui pénètre dans le bois, remonte par les surfaces libres et change la couleur du bois (Figure 4-3a), ce qui rend difficile voire impossible l'analyse par corrélation d'images. L'application de peinture sur la face observée permet au contraire de limiter la montée de l'eau sur la surface observée, à condition que la couche de peinture soit suffisamment épaisse (Figures 4-3b et 4-3c).

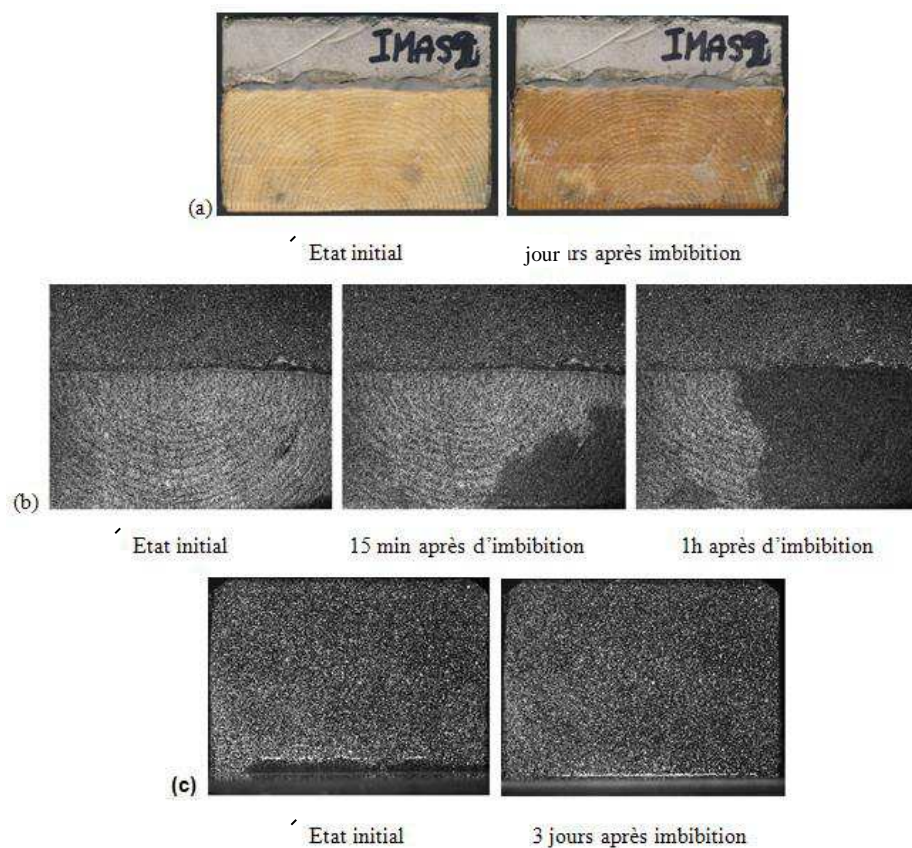


Figure 4-3 : Effet de la diffusion par capillarité de l'eau lors d'un test d'imbibition visible par les niveaux de gris du bois suivant 3 cas : (a) cas sans peinture d'un assemblage bois d'épicéa/mortier, (b) cas avec fine couche de peinture laissant légèrement apercevoir à travers la structure du bois, en image noir et blanc d'un assemblage bois d'épicéa/mortier (c) cas avec peinture épaisse, image noir et blanc d'un échantillon de bois seul.

Cependant, la présence de peinture en couche épaisse risque de modifier le comportement hydromécanique du bois. La peinture bouche les pores du matériau sur une certaine épaisseur à la surface où celle-ci a été appliquée, ce qui a pour conséquence de modifier localement l'absorption de l'eau, et donc les déformations du bois. Par ailleurs, appliquer de la peinture sur une seule face risque d'induire une hétérogénéité des déformations du bois, plus importante au niveau des surfaces libres non peintes par rapport à la surface peinte, et donc de rendre l'analyse d'images non représentative de ce qui se passe sur l'ensemble de l'échantillon (effet de gauchissement induisant des déformations hors plan). Il a donc été convenu d'appliquer de la peinture sur toutes les faces de l'échantillon, excepté sur la face inférieure au contact de l'eau. Nous avons effectué la mise au point de l'essai sur des échantillons de bois d'épicéa.

4.1.1.2 Évaluation des effets de bords

Pour cette étape, l'imbibition s'effectue toujours dans les mêmes conditions, le cœur du bois se trouvant en haut (face opposée à la face imbibée, sens « convexe »). La peinture est appliquée en couche épaisse sur tous les échantillons. Dans le but de valider la méthode DIC pour les tests d'imbibition, nous l'avons dans un premier temps comparée à des mesures directes par palmer, puis, dans un second temps, nous avons corrélié les mesures de champ de déformation à la hauteur de remontée d'eau caractérisée par IRM ou gammadensimétrie.

a) Validation mesures DIC / mesures palmer

Nous avons, via des mesures réalisées à l'aide d'un palmer, déterminé les déformations le long de l'axe Z de l'échantillon, dans différents plans XZ, pour vérifier s'il existe des effets de bords (Figure 4-4a) et avons comparé ces mesures à celles obtenues par la technique de corrélation d'images dans le plan YX, $Z=0$.

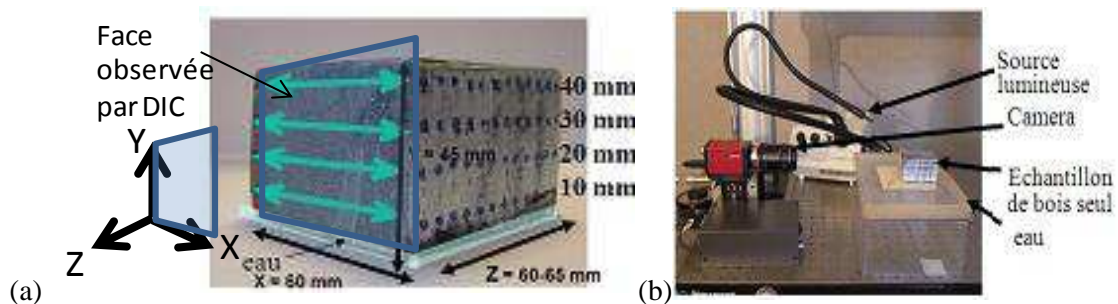


Figure 4-4 : (a) Mesures au palmer des déformations X globales. (b) Dispositif expérimental des mesures de déplacements provoqués par les déformations locales en surface par la technique de corrélation d'images.

Les résultats, après deux jours d'imbibition, sont présentés sur la Figure 4-5.

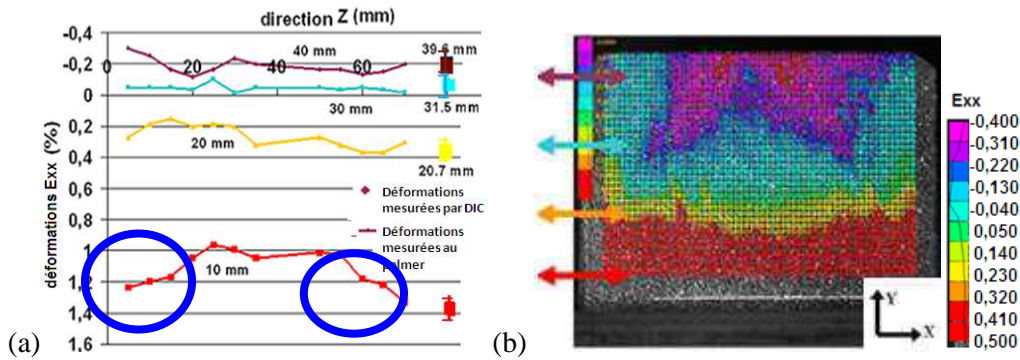


Figure 4-5 : (a) Comparaison des déformations globales mesurées à l'aide d'un palmer micrométrique après deux jours d'imbibition le long de l'axe Z de l'échantillon de bois seul, sur les quatre hauteurs Y=10 mm, 20 mm, 30 mm et 40 mm (figure 4-4a), et déformations moyennes mesurées dans le plan XY, en surface DIC présentées par un point sur le graphique. (b) Carte des déformations locales selon l'axe X obtenue par DIC après deux jours d'imbibition.

Les mesures de déformations globales à deux jours ont montré qu'il existe des effets de surface. Les déformations transversales, mesurées au palmer, proches de la face imbibée (Y=10 mm), augmentent aux bords de 20 à 35 % sur une profondeur de 15 mm. Il existe donc des effets de surface en bas de l'échantillon proche de la face imbibée, induite par la pénétration de l'eau dans l'échantillon par les bords libres. En revanche, ces effets disparaissent en haut de l'échantillon (mesures prises au-dessus de Y=20 mm), ce qui se traduit par une bonne corrélation entre les mesures au palmer et celles obtenues par DIC. Dans le cas d'un assemblage collé bois-béton, l'interface des deux matériaux n'est donc pas affectée par les effets de bords, ce qui valide la technique par DIC pour les tests d'imbibition.

b) Corrélation champ de déformation / hauteur de remontée d'eau

Nous avons exploré l'intérêt des techniques d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) et de gammadensimétrie pour l'étude de la diffusion de l'eau dans le bois.

L'IRM est une technique basée sur l'observation de la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) des protons de l'eau (Annexe 1), c'est-à-dire sur la réponse des protons soumis à un champ magnétique extérieur et à une excitation électromagnétique (ici séquence RMN SPI). L'intensité recueillie pour un élément de volume (voxel) dépend de la concentration de l'eau à l'endroit considéré, et on obtient ainsi une image de la répartition de l'eau dans l'échantillon. Cette technique a permis d'obtenir des images bidimensionnelles en niveau de gris, moyennées sur l'épaisseur Z de l'échantillon. La mesure est calée de manière à ce que le blanc corresponde à la teneur maximale d'eau dans le bois au moment de l'essai (teneur qui peut ne pas être la teneur en eau de saturation du bois). La mise au point de cette technique pour le matériau bois nécessitant des développements non triviaux, les mesures présentées ici se sont limitées à la localisation des zones de teneur en eau maximale de l'échantillon et restent donc qualitatives.

Le principe de la technique de gammadensimétrie repose sur le phénomène d'absorption par la matière de rayons gamma issus d'une source radioactive Cs^{137} (Annexe 2). Elle permet de calculer l'évolution de la densité en fonction de la hauteur Y du bois par rapport à un état de référence. Cette technique permet des mesures quantitatives et donne accès à la teneur en eau du bois h .

Nous avons effectué un suivi par IRM et par gammadensimétrie de deux échantillons de bois seul en situation d'imbibition de dimensions $60 \times 40 \times 60$ (mm³) suivant respectivement les axes X, Y, Z pour plusieurs échéances.

L'analyse par IRM a été faite dans le plan YZ (Figure 4-6), pour vérifier les effets de bords. La figure 4-6 montre que les effets de bords observés en déformation en bas de l'échantillon sont justifiés par la teneur en eau plus importante qu'au cœur de l'échantillon (remontée de l'eau par capillarité, puis pénétration suivant le sens des fibres). L'eau est présente de manière homogène au-delà d'une hauteur d'environ 15 mm, ce qui justifie que les déformations globales mesurées sont proches de celles données par la technique de corrélation d'images le long de l'axe Z au-dessus d'une hauteur de 20 mm. Des mesures réalisées à des échéances ultérieures ont confirmé ces observations.

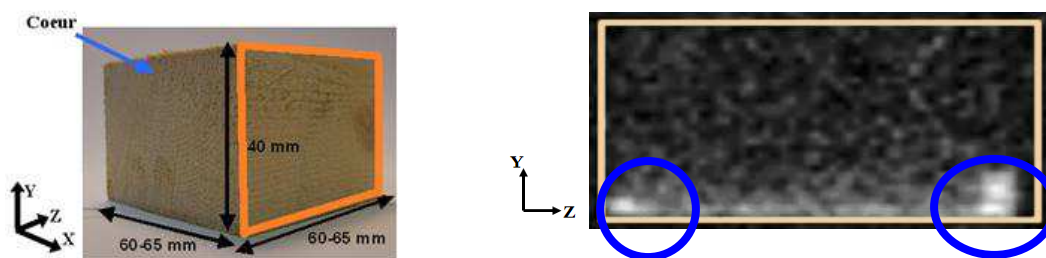


Figure 4-6 : Image IRM SPI d'un échantillon, moyennée sur X de bois seul testé en imbibition dans le plan YZ, obtenue après deux jours d'imbibition de l'échantillon de bois seul.

Les essais de gammadensimétrie ont permis d'obtenir trois profils de teneur en eau dans l'échantillon de bois, deux profils proches des deux surfaces libres et un dernier au cœur de l'échantillon (Figure 4-7). La figure 4-7 représente la variation de teneur en eau dans le bois moyennée sur l'épaisseur X de l'échantillon, en fonction de la hauteur de l'échantillon (l'axe des rayons γ est perpendiculaire au plan YZ, comme en IRM).

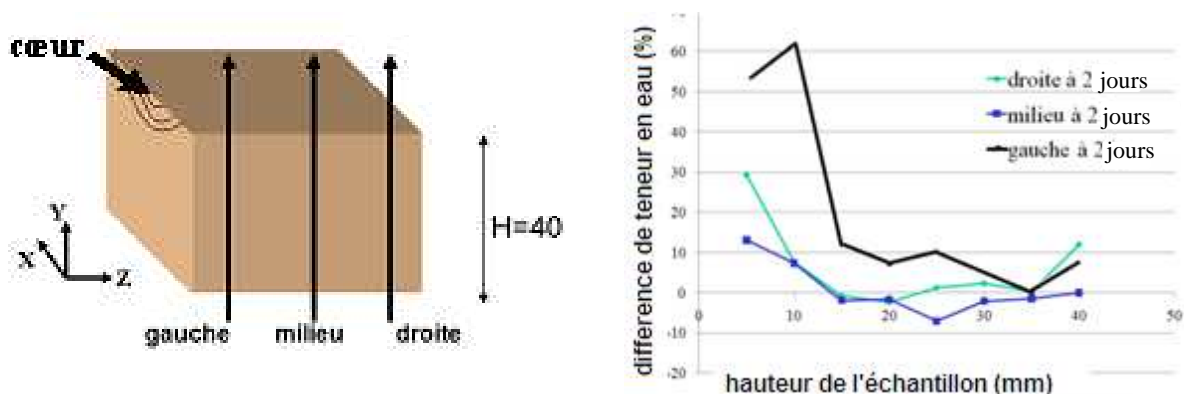


Figure 4-7 : Profils de teneur en eau obtenus par gammadensimétrie après deux jours d'imbibition de l'échantillon de bois. La teneur en eau de celui-ci est estimée à environ 10 % au démarrage des essais.

Les profils de teneur en eau, deux jours après imbibition, indiquent une présence d'eau plus importante près des surfaces libres en bas de l'échantillon (mesures à gauche et à droite). La variation d'humidité (Δh) mesurée dans le bois est deux, voire quatre fois supérieure au niveau des bords droit et gauche par rapport au milieu de l'échantillon sur une hauteur Y inférieure à 10 ou 15 mm. À noter que les profils d'humidité proches des surfaces libres sont dissymétriques, en cohérence avec les observations par IRM qui montrent que l'eau pénètre plus à cœur pour une face. Au-delà de Y=15 mm, le Δh mesuré est quasi-stable avec une variation de +/-10 %.

Les résultats obtenus par les mesures de déformations sont vérifiés par les images IRM dans le plan YZ et les trois profils de teneur en eau obtenus par gammadensimétrie confirment la présence d'eau plus importante près des surfaces libres en bas de l'échantillon. Après deux jours d'imbibition, l'eau pénètre dans le bois par capillarité sur une hauteur de 15 mm maximum, et diffuse le long de l'axe Z, parallèlement aux fibres du bois.

Au-delà de deux jours, les profils de teneur en eau obtenus par gammadensimétrie montrent une augmentation importante de l'eau aux bords de l'échantillon, toujours sur une hauteur de 15 à 20 mm (Figure 4-8). Les mesures « milieu » montrent que la teneur en eau dans le bois augmente au cours du temps suivant la direction Y sur une hauteur maximale de 20-25 mm, ce qui peut être interprété comme une diffusion de l'eau liée selon cet axe (teneur en eau inférieure au point de saturation des fibres).

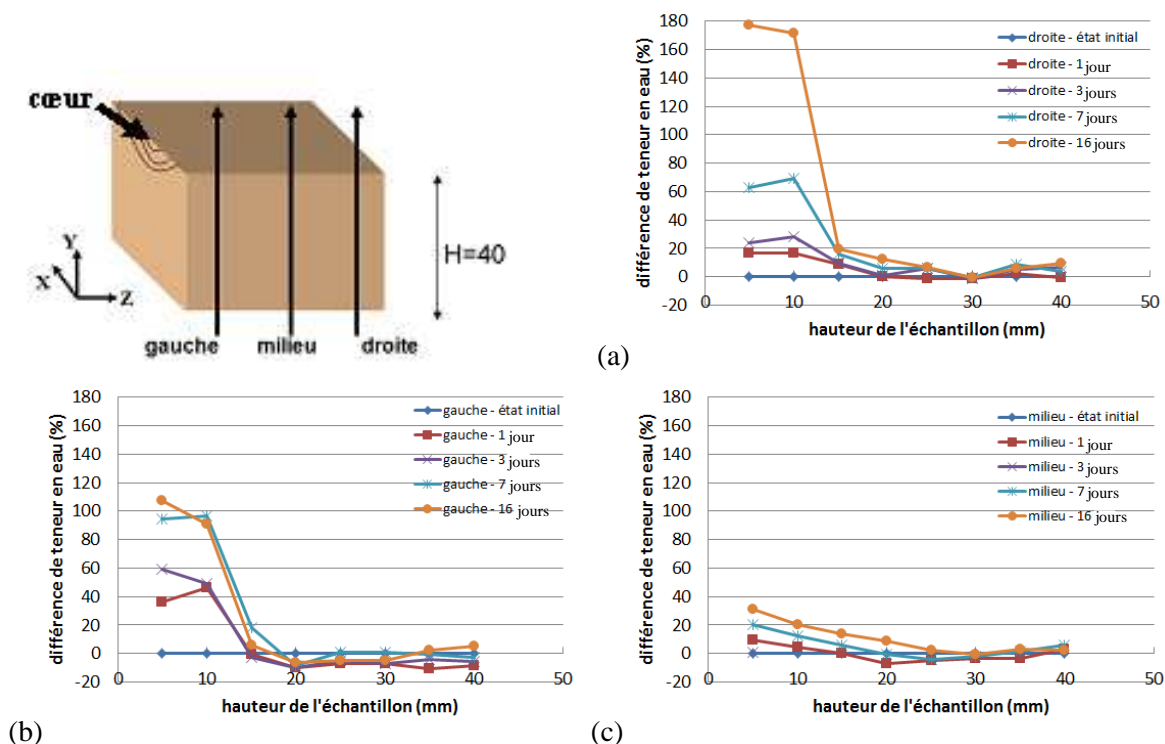


Figure 4-8 : Evolution des profils de teneur en eau dans le temps, obtenus par gammadensimétrie (a) à droite, (b) à gauche et (c) au milieu.

En conclusion, les mesures de déformations de surface par DIC sont représentatives des déformations de volume uniquement au-dessus d'une hauteur de 20 mm par rapport au niveau de l'eau.

4.1.1.3 Déformations libres du bois soumis à un test d'imbibition

Les dimensions des échantillons utilisés pour les essais d'imbibition sont calées sur les dimensions des lamelles du bois lamellé-collé d'épicéa dont nous disposons pour ces tests, soit 40 mm de hauteur, et 90 mm de largeur (Figure 4-9).

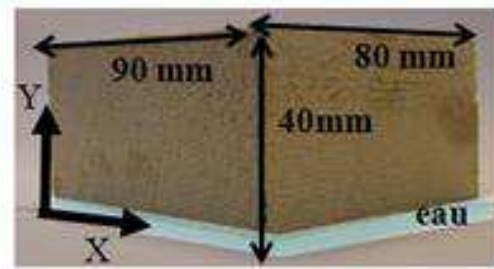


Figure 4-9 : Photo d'un échantillon de bois soumis à un test d'imbibition pour l'analyse de l'évolution des déformations libres du bois par la technique DIC.

Les déformations libres du bois d'épicéa soumis à un test d'imbibition ont été étudiées selon deux situations comme précisé au chapitre 2, paragraphe 2.2.2.2. (Figures 4-10a, et 4-11a) :

- le cas n°1 où le cœur du bois se trouve en haut, cernes orientés dans le sens convexe : échantillon désigné par EH ;
- le cas n°2 où le cœur du bois se trouve au niveau de la face imbibée, cernes orientés dans le sens concave : échantillon désigné par EB.

L'analyse de l'évolution des déformations selon les directions X et Y permet d'obtenir les cartes de déformations, ε_{xx} et ε_{yy} , représentées dans les figures 4-10 et 4-11. Nous observons que les déformations évoluent peu après cinq jours. Pour l'échantillon EH, nous mesurons, conformément aux attentes, des déformations d'extension en partie inférieure et sur une bonne partie de la hauteur, et enfin une déformation négative en fibre supérieure. Pour l'échantillon EB, les déformations sont moins grandes que dans le cas précédent. Ceci est dû aux effets antagonistes liés d'une part à l'orientation des cernes, lesquels tendent à créer une courbure concave sous l'effet de l'humidité, et, d'autre part, à l'avancement du front d'humidité, lequel démarre du bas de l'échantillon et tend par conséquent à créer une courbure convexe. La courbure observée est donc plus ou moins importante selon le sens des cernes dans le bois, ce qui met en évidence l'effet important des propriétés anisotropes dans le plan RT du bois.

En considérant que le bois au contact de l'eau liquide est saturé en eau liée à 12 jours (la figure 4-8 montre une augmentation de la teneur en eau supérieure à 60 % aux bords de l'échantillon après sept jours d'imbibition) sa teneur en eau liée va augmenter de 10 % (teneur en eau admise au départ de l'essai) à environ 25 % correspondant au point de saturation des fibres. La déformation libre orthoradiale est alors de 5,4 % et celle radiale de 2,7 % (retrait orthoradial de 0,27 % par % de teneur en eau et radial de 0,13 % par % de teneur en eau, voir chapitre 2, §2.1.1.3.). On observe que la déformation maximale mesurée par DIC est de l'ordre de 3 % en extension pour EH et de 1 % en extension pour EB. Il faut donc garder à l'esprit que les déformations mesurées ne sont pas directement interprétables pour la déduction des

Les cartes de déformations équivalentes et de déplacements (Figures 4-12, 4-13 et 4-14) illustrent les observations précédentes.

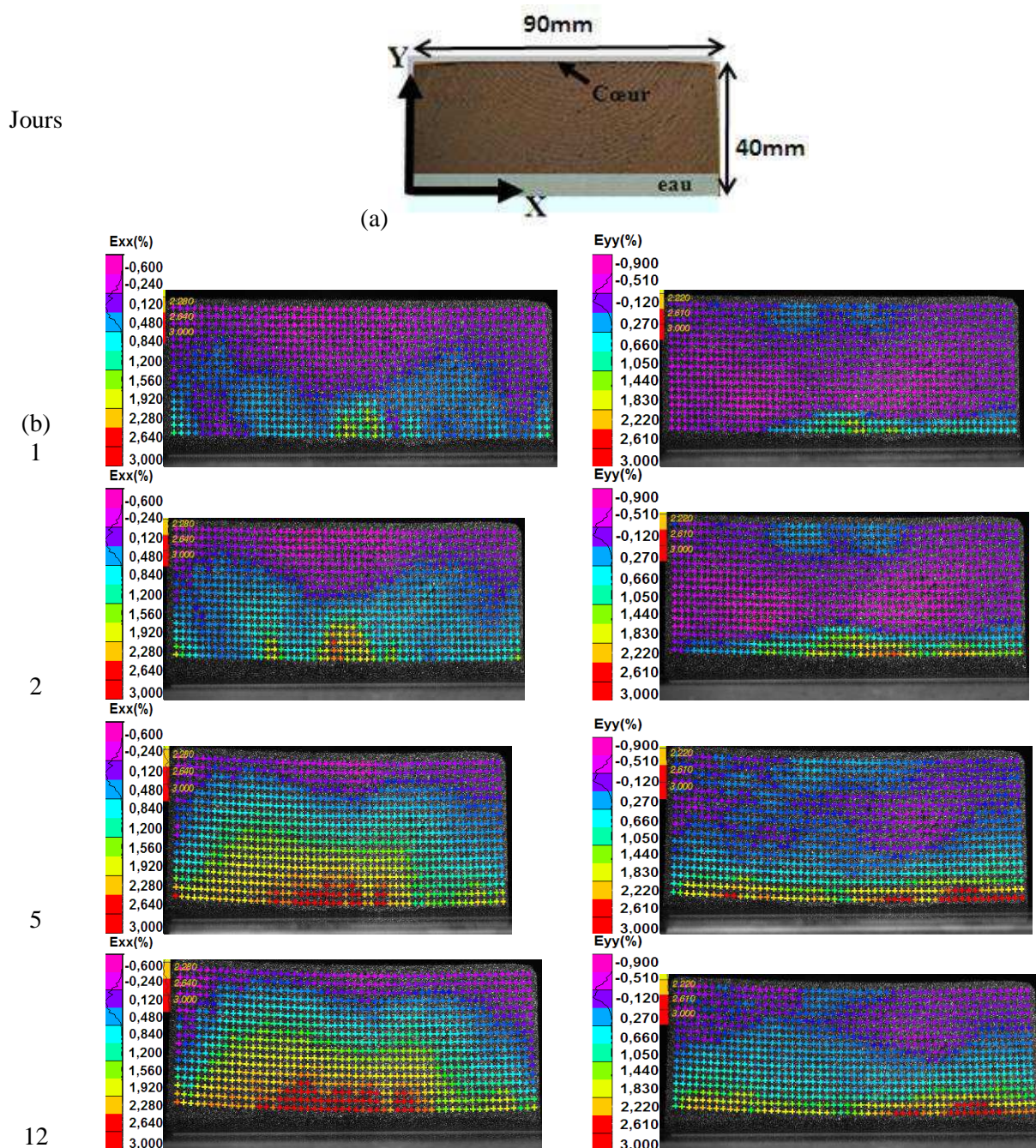


Figure 4-10 : (a) Photos de l'échantillon de bois d'épicéa testés, cas n°1, cœur en haut, (b) cartes de déformations dans la direction X (à gauche) et dans la direction Y (à droite). Déformations après 24 h, 48 h, 5 jours et 12 jours d'imbibition.

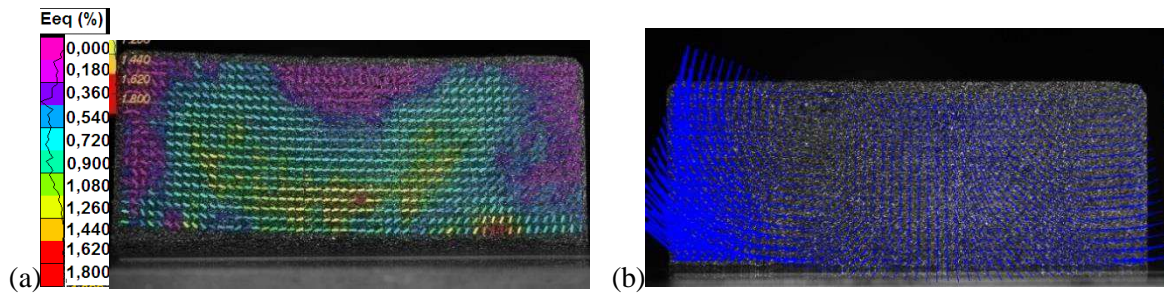


Figure 4-12 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon EH, après 12 jours d'imbibition.

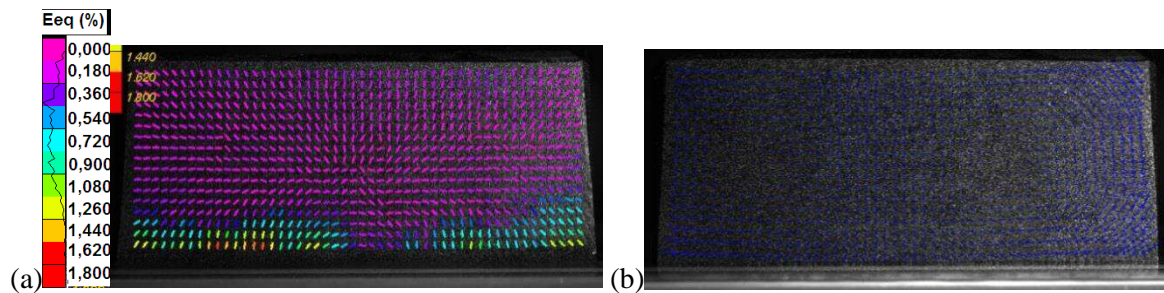


Figure 4-13 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon EB, après 12 jours d'imbibition.

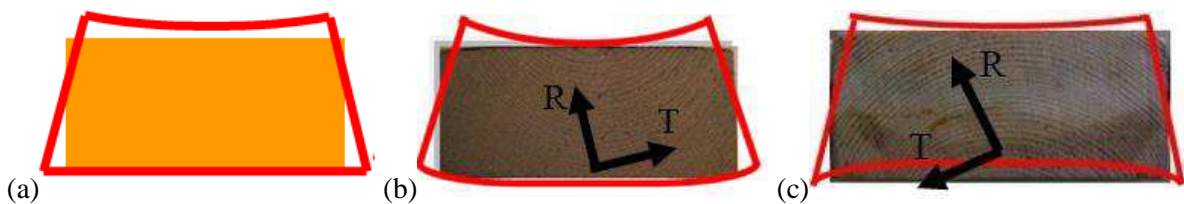


Figure 4-14 : Schématisation des profils de déformations observés pour le bois seul après imbibition pour (a) le cas d'un matériau supposé isotrope (b) le cas échantillon EH et (c) le cas échantillon EB.

En conclusion, l'analyse du comportement du bois libre soumis à un test d'imbibition a permis d'estimer les déformations qui vont être empêchées dans le bois au niveau de l'interface lors d'un test identique effectué sur un assemblage collé bois-béton (cas étudié au paragraphe 4.2.1). C'est dans le cas de l'échantillon EH, *i.e.* cernes convexes, que les contraintes d'arrachement (celles perpendiculaires au plan de collage) devraient être les plus importantes. L'essai en imbibition présenté ici reste cependant une approche simplifiée qualitative qui a été utile pour identifier les phénomènes en jeu, mais il reste différent du cas réel de la structure soumise à des conditions d'humidité relative extérieure variables pour lequel toutes les faces du bois sont au contact de l'air. C'est ce que nous analysons dans le paragraphe suivant.

4.1.2 Validation de la technique DIC pour les tests de chargement sous HR

Tous les échantillons de bois utilisés pour les essais de chargement sous HR sont prélevés dans une poutre de lamellé-collé dont l'épaisseur des lamelles est de 30 mm (Figure 4-14). Les échantillons, initialement conservés en équilibre avec un air ambiant HR de 60 %, sont ensuite placés dans une enceinte d'humidité relative de 97 %. L'objectif de cette partie est dans un premier temps de mettre au point la technique DIC pour cette situation, et, dans un second temps, d'obtenir des mesures de champ de déformation, très utiles pour la suite de l'étude. Pour ce qui concerne la validation de la méthode DIC, nous savons d'ores et déjà qu'elle est conditionnée par le bon contrôle des directions de transfert d'humidité. Dans le cas présent, la méthode de mesure est validée si nous montrons que le transfert est bi directionnel, *i.e.* dans le plan XY. Nous avons recouru à des mesures IRM pour aider à la mise au point du dispositif expérimental (enceinte plus dispositifs de protection).

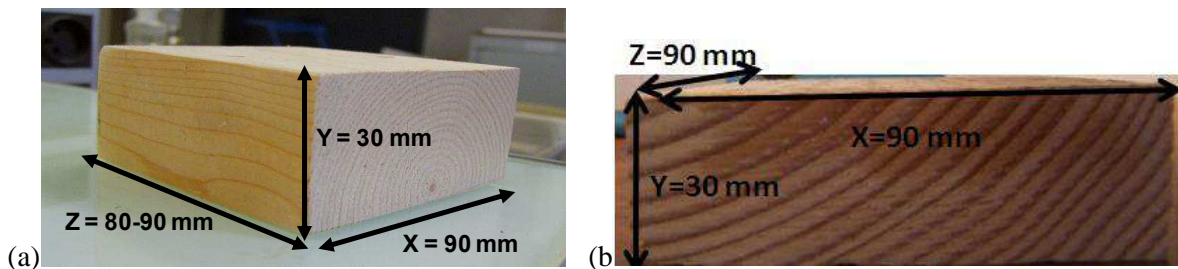


Figure 4-15 : Photo d'un échantillon de bois seul utilisé pour les tests de chargement sous HR (a) épicéa, (b) douglas.

4.1.2.1 Mise au point de l'essai

Dans le cas de chargement hydrique sous humidité relative constante, la démarche pour valider la méthode DIC est différente de celle présentée précédemment. Pour que l'échantillon soit en situation de diffusion dans le plan XY, les deux faces extrêmes de l'échantillon dans ce même plan XY sont isolées de l'ambiance par une vitre en verre, collée sur les bords à l'aide d'un joint silicone (Figure 4-16). Le mouchetis est quant à lui appliqué sur l'une de ces deux faces protégées. Une fois préparé, l'échantillon est stocké dans une enceinte climatique dont l'HR est de 60 %. Lorsque la masse de l'échantillon, mesurée à 0,01 g près, ne varie plus, l'échantillon est considéré à l'équilibre, et peut alors être testé et chargé à HR=97 %.

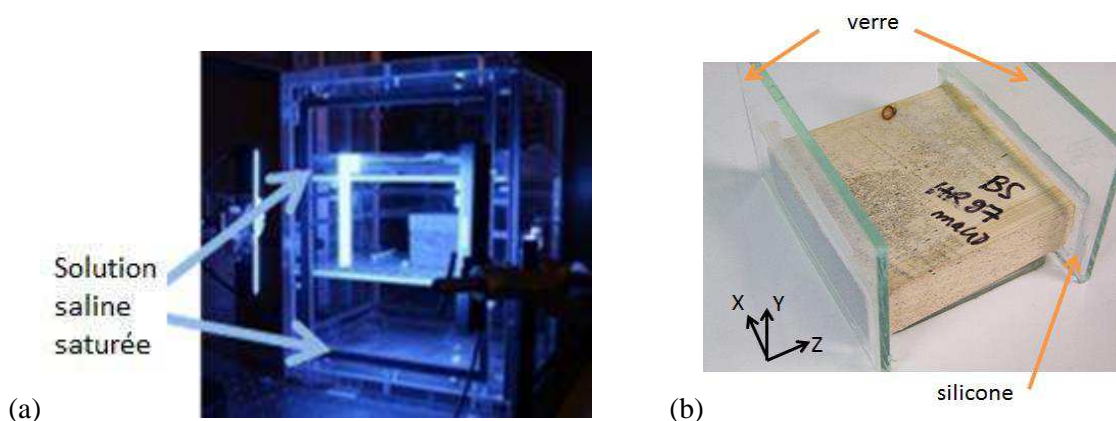


Figure 4-16 : Photo de l'échantillon de bois seul soumis à un test de chargement sous HR=97 % (a) vue de l'enceinte dont l'humidité est contrôlée par une solution saline saturée (b) mise en place dans l'enceinte de l'échantillon testé. Présence de verre assemblé à l'échantillon par du joint silicone pour minimiser l'entrée de l'eau selon le sens des fibres (selon la direction z).

Nous avons effectué un suivi de l'humidité dans le bois via des images obtenues par IRM sur un échantillon comparable, préparé identiquement. Les images obtenues sont des images SPI moyennées (Annexe 1) sur l'épaisseur de l'échantillon. Elles sont représentées dans les plans XY et YZ de l'échantillon (Figure 4-17).

	État initial	2 jours après chargement hydrique	14 jours après chargement hydrique
Plan XY			
Plan YZ			

Figure 4-17 : Images SPI obtenues par IRM dans les plans XY et YZ d'un échantillon de bois seul (rectangle central rouge) soumis à un test de chargement hydrique à HR=97 %. De gauche à droite : état initial à l'équilibre à HR=60 %. 2 jours après chargement, 14 jours après chargement.

Les images, pour les plans XY et YZ dont les teneurs en eau sont moyennées respectivement selon les directions Z et X, montrent une augmentation de la teneur en eau de l'échantillon dans le temps. Cette augmentation de l'humidité du bois s'observe plus difficilement pour le plan YZ car la présence de silicone, de teneur en eau relativement importante par rapport au bois, masque quelque peu l'humidité de celui-ci. Dans le plan XY, nous n'observons pas clairement de gradient de teneur en eau. Ce résultat signifie qu'il est soit inexistant, soit qu'il existe mais s'équilibre très rapidement ; ce biais qui sera discuté plus précisément au chapitre 5, pourrait être dû à une mauvaise étanchéité du joint de silicone (permettant

de bloquer la diffusion le long de l'axe des fibres). Nous considérons ces mesures comme acceptables pour valider la DIC dans ce cas de figure.

L'utilisation de la corrélation d'images va permettre de mesurer le champ de déformation dans le bois résultant du champ de teneur en eau et de la réponse structurelle de l'échantillon.

4.1.2.2 Déformations libres du bois soumis à HR=97 %

Nous avons étudié les comportements hydromécaniques de deux échantillons de bois, l'épicéa et le douglas (Figures 4-18(a) et 4-19(a)). Les chargements hydriques ont duré 21 jours. L'analyse par la technique DIC (Figures 4-18(b) et 4-19(b)) montre qu'il y a bien une diffusion de l'eau au sein de l'échantillon par les faces latérales libres. Cette diffusion est marquée notamment par les déformations ε_{yy} , lesquelles mettent en évidence un état non homogène de l'humidité dans le bois. L'observation des déformations ε_{xx} ne fait pas apparaître ces gradients de manière aussi marquée, mais cette situation est confirmée ensuite par des calculs aux éléments finis (chapitre 5). La vitesse de transfert de la vapeur d'eau est telle qu'en 15 jours, elle a atteint le cœur de l'échantillon.

Sur les cartes de déplacements (Figure 4-20(b) et 4-21(b)), nous retrouvons pour l'échantillon d'épicéa la symétrie initiale de celui-ci, symétrie qui disparaît partiellement pour l'échantillon de douglas. Quant aux déformations équivalentes de Von Mises, elles suivent assez fidèlement les cernes du bois. Sur la figure 4-22 sont schématisées les déformations macroscopiques des échantillons, telles qu'elles sont déduites des cartes de déplacements.

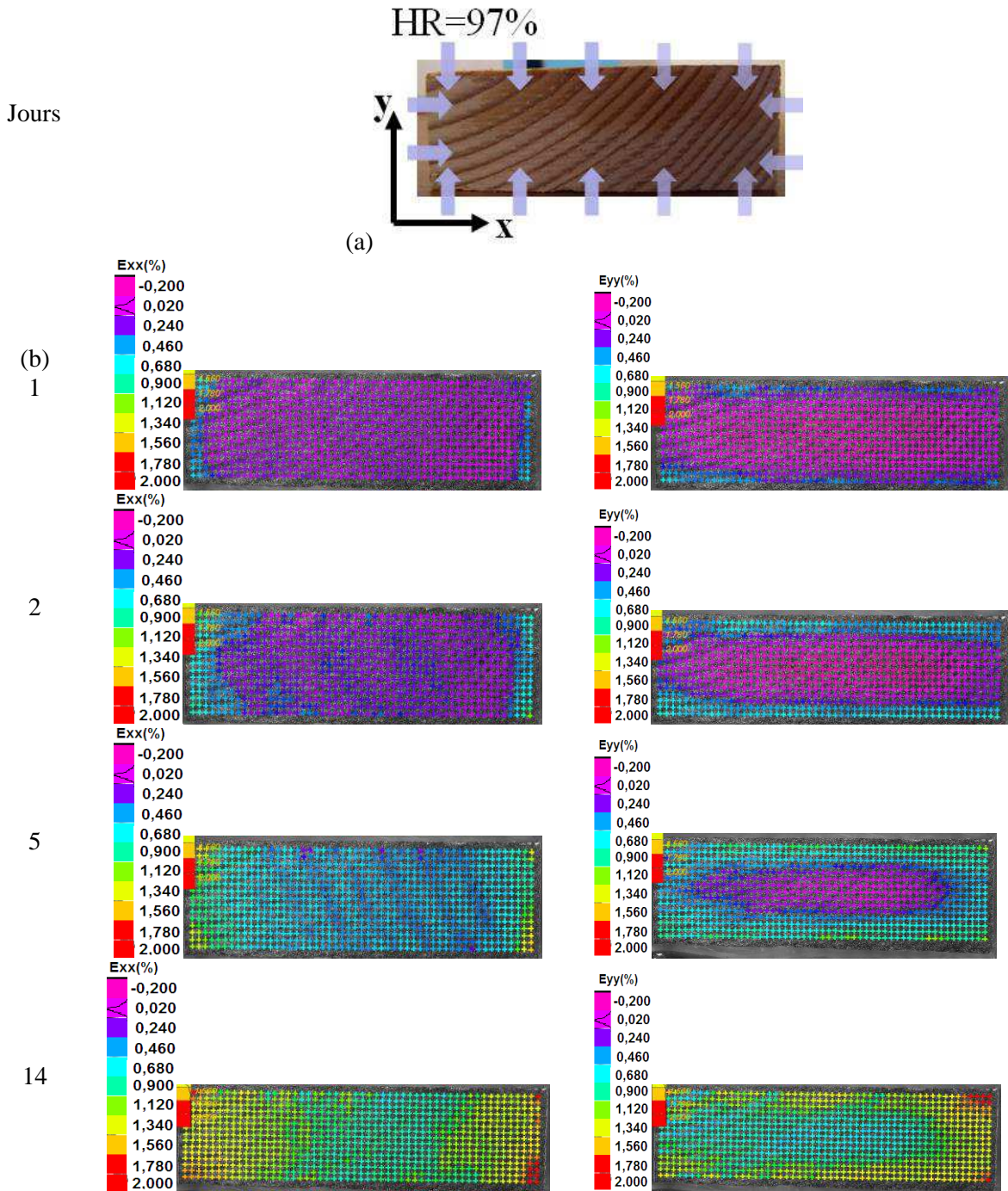


Figure 4-19 : (a) Photos des échantillons de bois testés de douglas testé sous chargement HR=97 % (b) cartes de déformations dans la direction X (à gauche) et Y (à droite). Déformations à plusieurs échéances, après 24 h, 48 h, 5 jours et 14 jours de chargement hydrique.

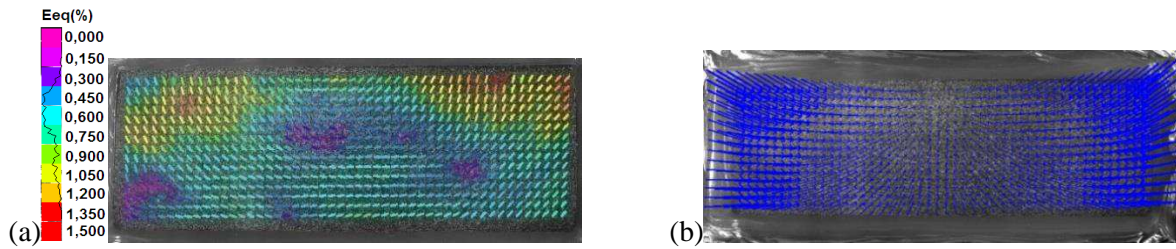


Figure 4-20 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon d'épicéa, 14 jours de chargement sous HR=97 %.

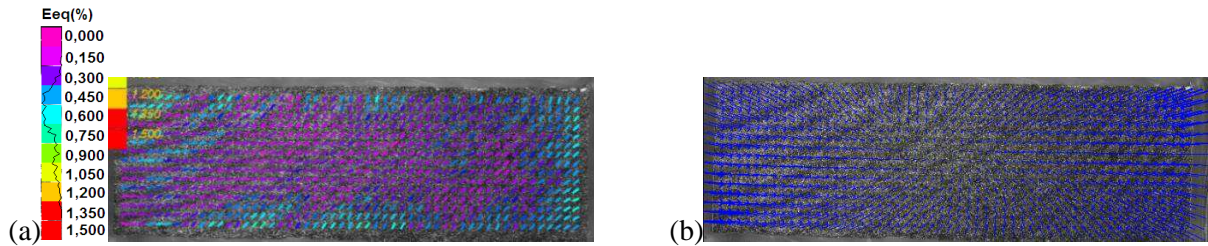


Figure 4-21 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon de douglas, 14 jours de chargement sous HR=97 %.

On peut schématiser les profils de déformation des deux échantillons de bois testés après 14 jours (Figure 4-18).

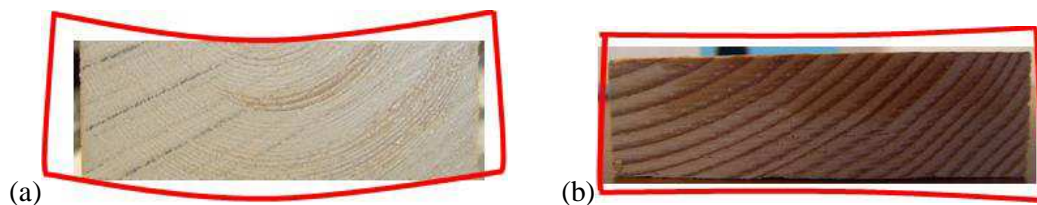


Figure 4-22 : Schématisation des profils de déformations observés pour le bois seul après 14 jours de chargement sous 97 % d'humidité relative (le bois n'est pas à l'équilibre hygroscopique) pour (a) le cas de l'échantillon d'épicéa testé (b) le cas de l'échantillon de douglas.

En conclusion de cette partie, nous avons mis au point la méthode de préparation des échantillons pour l'observation des déformations par DIC d'échantillons au contact d'un air humide. Des mesures ont été effectuées sur deux échantillons de bois, différents par leur essence (épicéa et douglas), par leurs largeurs de cernes autant que par leurs structures (emplacement des cernes). L'étude du comportement libre de ces deux bois va permettre de quantifier les effets d'entrave des déformations du bois dus au béton dans le cas d'échantillons mixtes bois-béton.

4.2 Comportement hydromécanique de l'assemblage bois-béton

Les essais que nous présentons dans ce paragraphe portent sur l'étude du comportement d'un assemblage collé bois-béton soumis à des chargements hydriques. De manière générale, les biais introduits par le protocole expérimental ne seront pas considérés (diffusion de l'eau selon le sens des fibres, effet de la peinture). Ceux-ci seront discutés plus précisément dans le chapitre 5 dans lequel les résultats expérimentaux seront comparés aux simulations numériques.

4.2.1 Série 1 : Tests sous imbibition - échantillons épicea-mortier

Les essais de la série 1 sont des essais préliminaires d'imbibition permettant d'observer dans un délai court les phénomènes principaux en fonction des trois colles choisies préalablement (époxy, acrylique modifiée et polyuréthane bi-composants). Pour chaque type de colle, les deux sens concave et convexe des cernes sont étudiés. Les échantillons sont soumis au chargement hydrique au-delà de 28 jours après la fabrication, lorsque les propriétés mécaniques du mortier sont stabilisées.

4.2.1.1 Orientation convexe des cernes - colle époxy

Le premier cas étudié est celui d'un assemblage utilisant une résine époxy de type sikadur LP32. Cette colle permet le collage du mortier frais sur la colle fraîche (Figure 4-23).

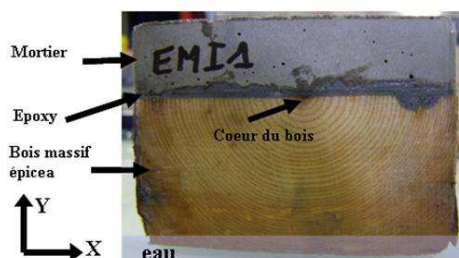


Figure 4-23 : Face observée par analyse d'images. Assemblage épicea-mortier.

L'analyse des déformations locales a donné les cartes de déformations suivantes présentées par les figures 4-24 et 4-25. On observe sur les cartes de déformations ε_{xx} et ε_{yy} deux types de mécanismes d'endommagement. Le premier est un décollement de l'interface qui apparaît après une heure d'imbibition, le second une fissuration verticale dans le mortier.

La diffusion de l'eau dans le bois seul orienté dans le sens convexe induit une courbure vers le bas de celui-ci comme décrit par la figure 4-14b. Dans le cas d'un assemblage bois-béton collé, le béton ne suit pas les déformations du bois et cela induit au niveau de l'interface un décollement visible sur la carte de déformations ε_{yy} par des déformations de l'ordre de 0,15 % (Figure 4-24b). Ce décollement s'initie en zone centrale de l'interface pour se propager vers l'extérieur jusqu'à environ 2 cm des bords de l'échantillon. Le décollement s'intensifie et à long terme, il devient visible à l'œil nu : on observe des déformations ε_{yy} au niveau de l'interface allant jusqu'à 2 % à 10 jours. Mais le décollement n'est pas complet, le collage est

encore suffisamment résistant pour entraîner une fissuration du mortier après 25 h d'imbibition (Figure 4-24a). Cette fissure verticale évolue et atteint une ouverture de l'ordre de 1 mm à 10 jours. Les déformations empêchées du bois sont dues à la rigidité du mortier et aux propriétés mécaniques et adhésives de la colle.

Les cartes présentées par la figure 4-25, livrant les déformations équivalentes au sens de Mises et les déplacements montrent clairement que les déformations avec du cisaillement sur les bords et de l'arrachement en zone centrale sont localisées au niveau de l'interface et du bois, et on peut considérer que les déformations dans le mortier sont négligeables.

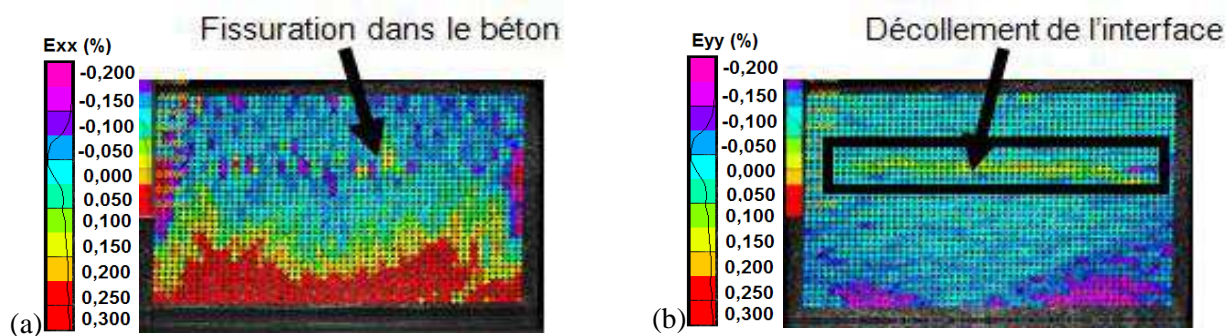


Figure 4-24 : Cartes de déformations, (a) composante XX des déformations locales, apparition d'une fissure dans le béton après 25 h d'imbibition, (b) composante YY des déformations locales, fissuration de l'interface bois-mortier observable dès 1 heure d'imbibition.

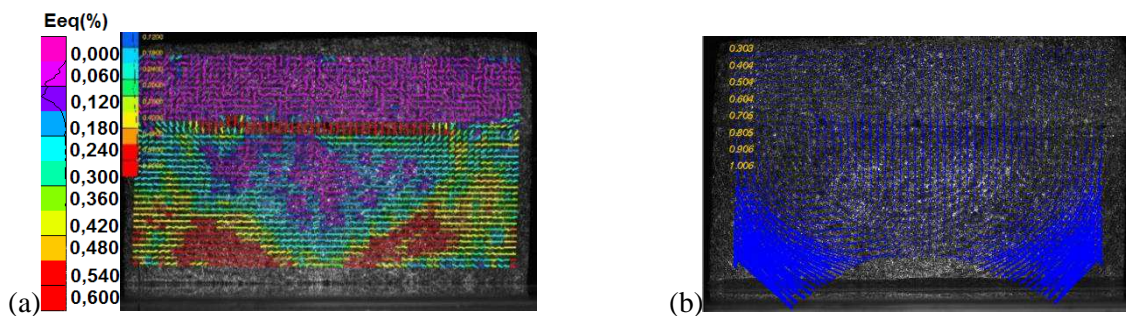


Figure 4-25: (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises et (b) carte de déplacements après 28 heures.

4.2.1.2 Orientation concave des cernes - colle époxy

Le collage s'effectue avec le même protocole que précédemment. L'échantillon est représenté par la figure 4-26.

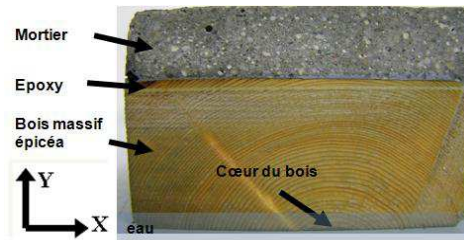


Figure 4-26 : Face observée par analyse d'images. Assemblage épicea-mortier.

Dans cette configuration, nous n'observons pas de fissure dans le mortier ni de décollement de l'interface même après 21 jours (Figures 4-27 et 4-28). Nous rappelons que les déformations de flexion du bois dans cette configuration sont moins importantes que dans la précédente (Figures 4-14b et 4-14c). Les contraintes au niveau de l'interface induites par les déformations hydriques du bois par l'interface ne sont donc pas suffisantes pour provoquer la fissuration dans le mortier ou le décollement de l'interface.

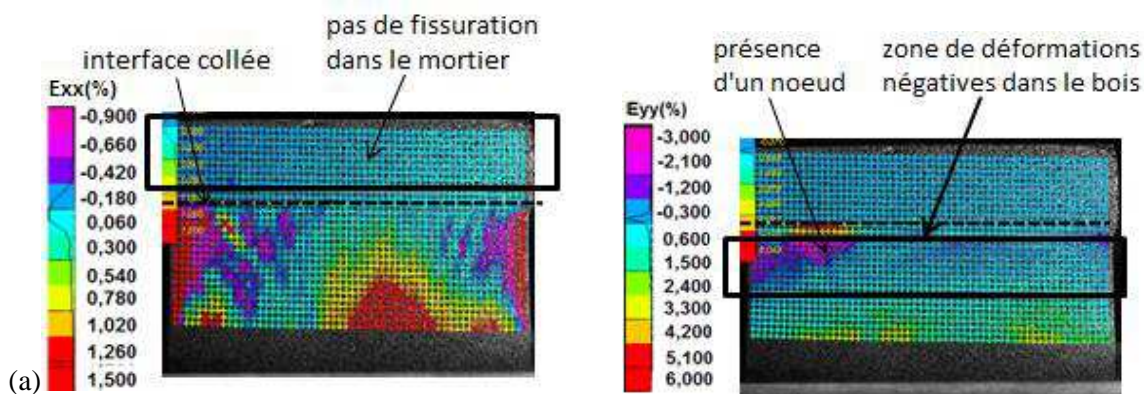


Figure 4-27 : Cartes de déformations d'un échantillon épicea-mortier collé après 21 jours d'imbibition (a) composante XX des déformations locales, (b) composante YY des déformations.

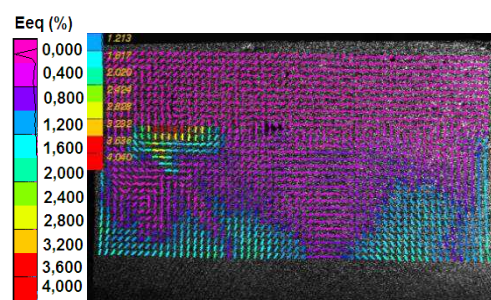


Figure 4-28 : Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises d'un échantillon épicea-mortier après 21 jours d'imbibition. À noter près de l'interface une zone plus déformée qui correspond à la présence d'un nœud.

4.2.1.3 Colle polyuréthane - colle acrylique modifiée

Dans le cas de la colle polyuréthane bi-composants, les cartes de déformations montrent des déformations dans le bois similaires aux déformations libres du bois, avec de la contraction dans la direction X du bois à

proximité de l'interface. Au cœur de l'interface on remarque des déformations ε_{yy} positives qui peuvent traduire un décollement de l'interface. Nous rappelons que l'observation par analyse d'images demande une interprétation des cartes de déformations, et que la lecture de ces cartes pour la colle PU ne permet pas d'assurer qu'un décollement s'est produit, du fait du très faible module de celle-ci et de son fort allongement à rupture (Figure 4-29). Cependant, à l'œil nu, nous constatons un décollement entre la colle et le bois dès 24 h d'imbibition et ceci pour les deux sens de bois étudiés.

Ces observations traduisent une adhérence insuffisante de la colle polyuréthane bi-composants sur le substrat bois, qui a déjà été constatée par les tests Push-Out qui ont montré une très mauvaise résistance au cisaillement. Cette résine est donc inutilisable pour les assemblages bois-béton.

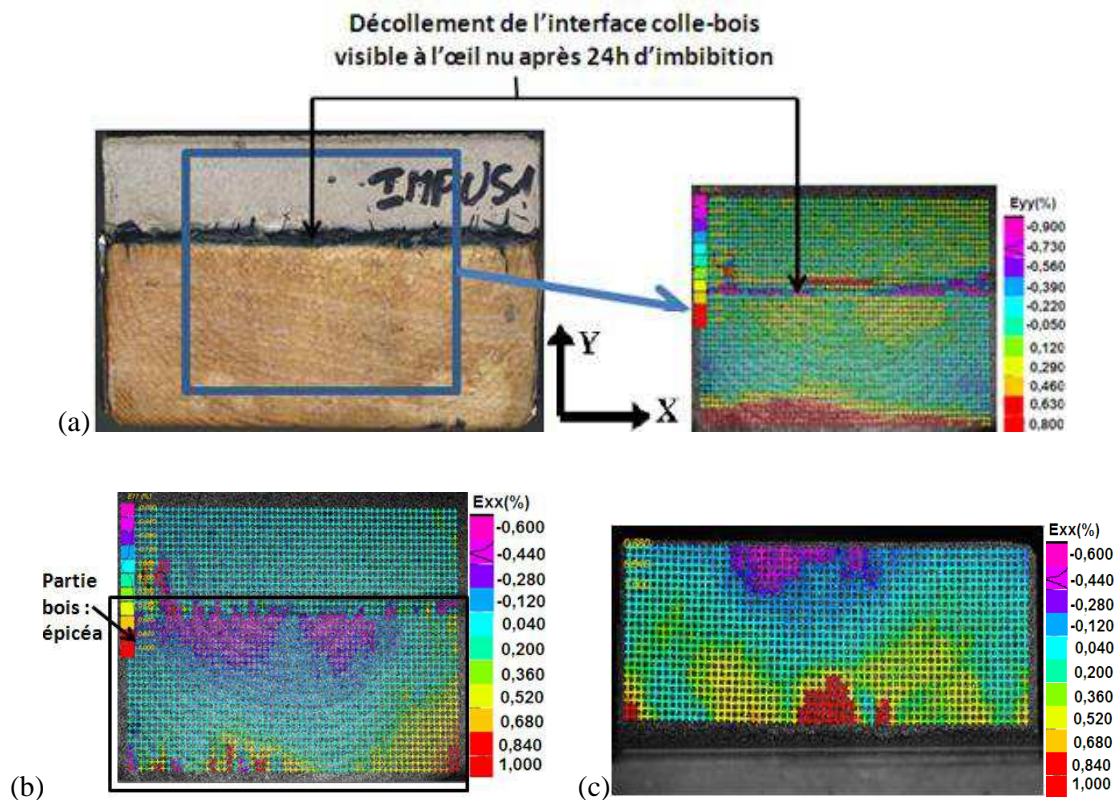


Figure 4-29 : Essai d'imbibition sur un assemblage bois sens convexe-mortier collé avec une colle polyuréthane bi-composants (sikaflex L15) après 24 h d'imbibition (a), déformations ε_{yy} (b) déformations ε_{xx} (c) par comparaison déformations ε_{xx} d'un échantillon de bois seul dans la même configuration.

Concernant l'assemblage bois-mortier collé avec la colle acrylique modifiée, le comportement est similaire à celui obtenu pour la colle époxy. On observe :

- une fissuration du mortier perpendiculairement au plan de collage et un décollement de l'interface pour l'échantillon épicea sens convexe-mortier (Figure 4-30) ;
- l'absence de fissuration pour l'échantillon épicea-mortier sens concave (Figure 4-31).

Ces résultats sont prévisibles du fait du comportement mécanique de la colle et de la bonne adhérence montrée par les essais Push-Out dans le chapitre 3.

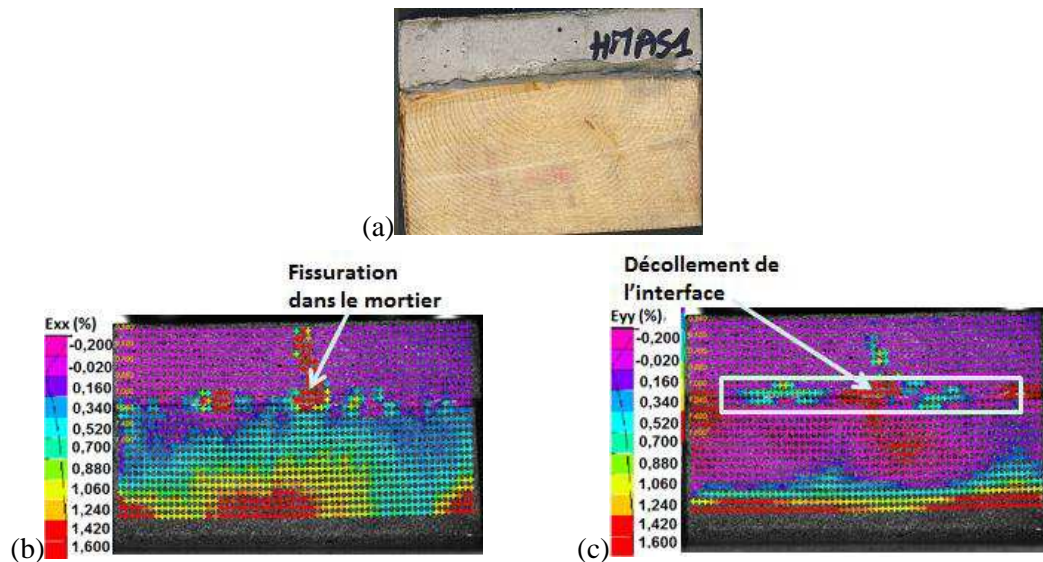


Figure 4-30 : (a) Photo échantillon bois sens convexe -mortier collé avec une colle acrylique, (b) carte de déformations ϵ_{xx} (c) carte de déformations ϵ_{yy} après 10 jours d'imbibition.

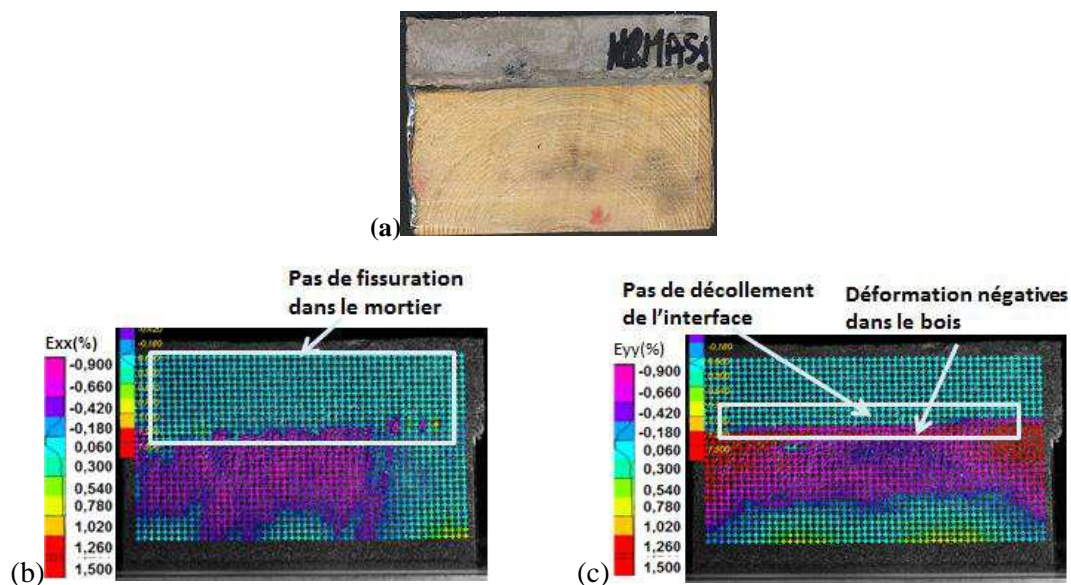


Figure 4-31 : (a) Photo échantillon bois sens concave -mortier collé avec une colle acrylique, (b) carte de déformations ϵ_{xx} (c) carte de déformations ϵ_{yy} après 10 jours d'imbibition.

4.2.1.4 Conclusion

En conclusion de cette partie, nous avons montré :

- pour l'adhésif époxy et acrylique modifiée : le sens des cernes influence la tenue de l'assemblage. Aucune dégradation n'est observable par DIC pour le sens concave des cernes. Deux mécanismes d'endommagement sont observés dans le cas des cernes convexes. Le premier est un décollement du bois au centre de l'interface visible à l'œil nu à long terme, le second est une fissuration du mortier ;

- la colle polyuréthane est inadaptée du fait des décollements observés, quel que soit le sens du collage (convexe ou concave) et ceci très rapidement.

Il s'agit de vérifier cette conclusion dans le cas de chargements hydriques plus réalistes, c'est-à-dire sous humidité relative élevée. Le choix de colle ayant déjà été fait, l'ensemble des essais de chargement sous HR se fera sur des assemblages bois-béton collés par une résine époxy.

4.2.2 Série 2 : Assemblages avec mortier - tests sous HR=97 %

La série 2 consiste à soumettre des assemblages, initialement en état d'équilibre à une humidité relative de 60 % (HR), à une HR de 97 % comme dans le cas du bois seul. La colle utilisée est la Sika32LP, avec laquelle le mortier est coulé frais sur la colle non polymérisée. Le chargement hydrique à 97 % d'HR, qui débute après une cure d'au moins 28 jours, dure au moins trois semaines. Cette échéance présente un bon compromis entre le temps alloué à l'essai et les possibilités d'en tirer les conclusions.

Les deux mêmes configurations que les précédentes (sens des cernes convexe et concave) ont été étudiées. Les échantillons testés sont présentés sur la figure 4-32.

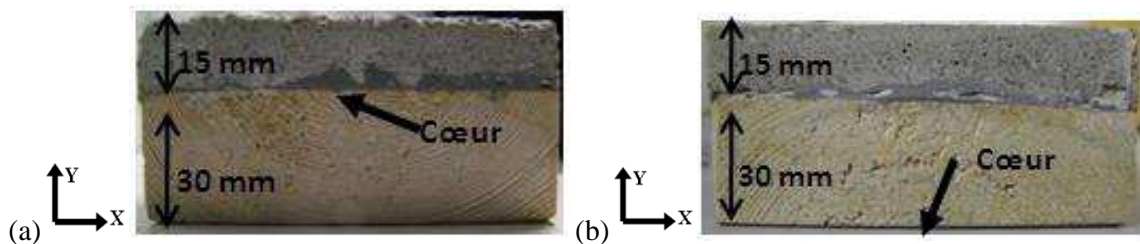


Figure 4-32 : Faces observées par DIC (a) échantillon bois épicéa-mortier collé, sens convexe, (b) bois épicéa-mortier, sens concave.

Les résultats donnés par l'analyse des déformations locales sont présentés par les Tableaux 1 et 2 de l'annexe 3. Nous retiendrons les conclusions suivantes :

4.2.2.1 Cas épicéa-mortier sens convexe

Dans le cas de l'assemblage épicéa sens convexe-mortier soumis à un chargement sous HR, les cartes de déformations présentées par les figures 4-33 et 4-34 montrent que :

- nous n'observons pas de décollement au niveau de l'interface sur les cartes de déformations ε_{yy} et de déplacement (Figure 4-33) ;
- la carte de déformations ε_{xx} après sept jours de chargement hydrique (Figure 4-34a) montre des déformations négligeables dans le bois proche de l'interface qui traduisent des déformations empêchées du bois par l'interface. À cette échéance, on remarque un début de fissuration dans le mortier. Deux fissures sont visibles de part et d'autre du cœur de l'interface par une localisation des déformations qui atteignent 0,3 % ;

- une troisième fissure fait son apparition dans le mortier au centre de l'interface après 10 jours de chargement sous HR (Figure 4-34b). On mesure pour les 3 fissures une ouverture de 0,7 %, soit une évolution rapide de celles-ci. À ce stade de l'essai les déformations ε_{xx} dans le bois en zone centrale proche de l'interface sont importantes (de l'ordre de 0,5 à 0,7 %). Le bois semble pouvoir se déformer librement du fait de la fissuration du mortier.

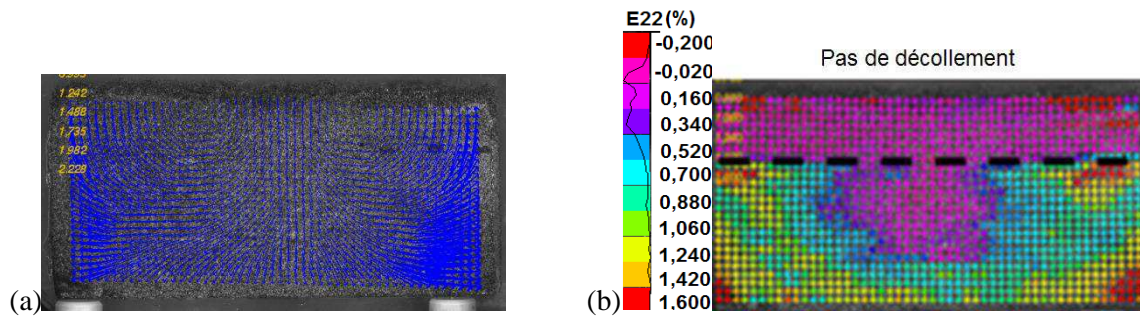


Figure 4-33 : (a) carte de déplacements et (b) carte de déformations ε_{yy} d'un échantillon épicea-mortier époxy sens concave, après 14 jours de chargement sous 97 % d'humidité relative, pas de décollement observable à l'interface.

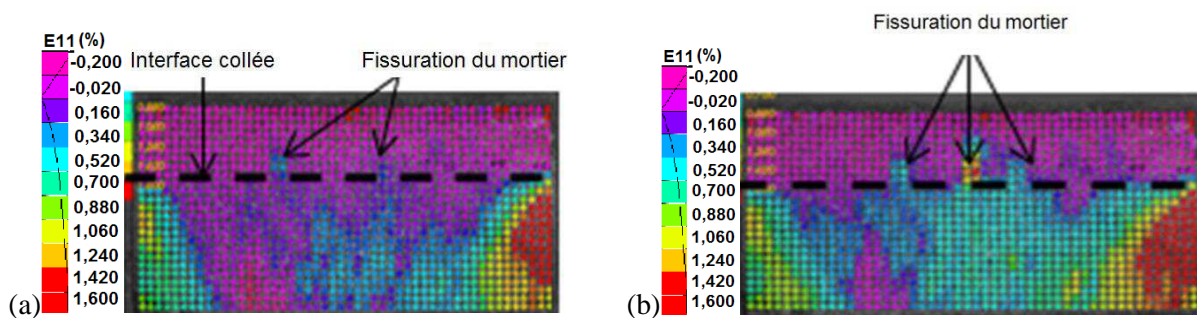


Figure 4-34 : Carte de déformations ε_{xx} d'un échantillon épicea-mortier-époxy sens convexe, (a) après 7 jours de chargements hydrique, apparition des premières fissures dans le mortier, (b) 10 jours après le chargement hydrique, évolution importante des fissures dans le mortier.

Dans le traitement par analyse d'images, nous avons pu obtenir l'évolution temporelle des déformations de deux points situés de part et d'autre de l'interface (Figure 4-35) et proches de celle-ci, au niveau de la zone endommagée, et représentés sur la figure 4-36.

Ces courbes montrent une augmentation importante des déformations suivant l'axe XX (Figure 4-36a) dans le mortier et dans le bois à 10,5 jours environ après le chargement hydrique. En effet, une fissure observée sur les cartes déformations ε_{xx} apparaît à 10 jours environ au niveau de ces deux points proches de l'interface, ce qui est confirmé par les déformations de cisaillement sur la figure 4-36c. Le bois gonfle librement au niveau du point B, les contraintes induites par la rigidité de l'interface sont relâchées. Dans le mortier, au-delà de 10 jours, on ne mesure plus les déformations, mais l'ouverture de la fissure, ce qui est visible par le décrochement sur la courbe figure 4.36a.

Les déformations suivant l'axe vertical YY sont par contre de même amplitude que l'incertitude expérimentale ($\pm 0,07$ %) (Figure 4-36b), et sont donc difficilement exploitables.

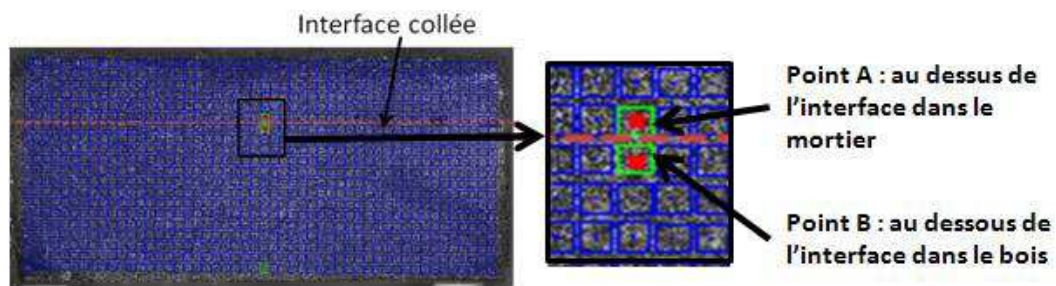


Figure 4-35 : Représentation des deux points suivis dans le temps par la technique de corrélation d'images.

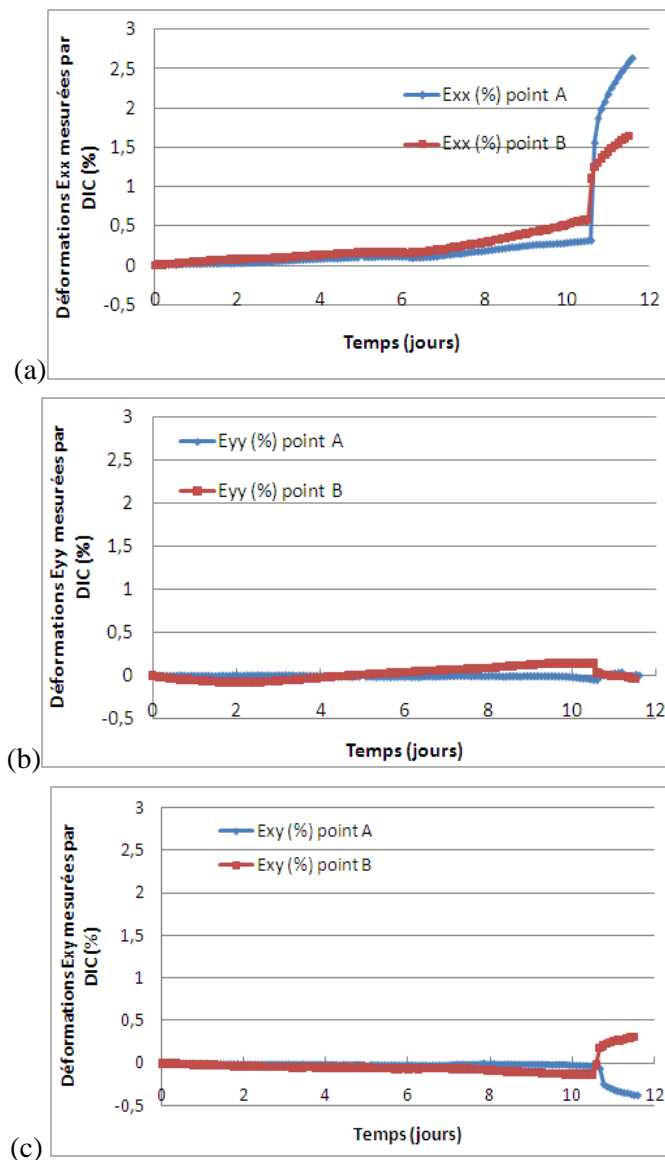


Figure 4-36 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ϵ_{xx} (b) ϵ_{yy} et (c) ϵ_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le mortier) et B (dans le bois) proches de l'interface pour l'échantillon épica-mortier-époxy, sens convexe.

4.2.2.2 Cas épicea-mortier sens concave

Nous n'observons ni fissure, ni décollement du mortier (Figure 4-37). Les contraintes induites par le gonflement du bois sont donc moins importantes dans cette configuration.

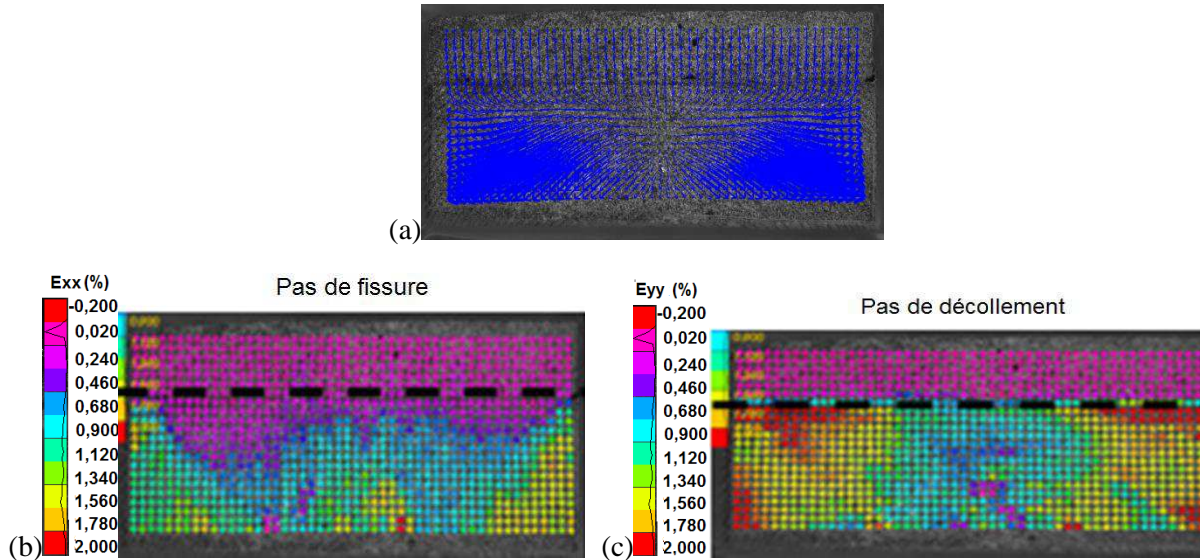


Figure 4-37 : (a) carte de déplacements, cartes de déformations locales (b) : composante XX des déformations et (c) composante YY des déformations. d'un échantillon épicea-mortier sens concave, après 25 jours de chargement sous HR=97 %.

Cette observation est confirmée par le suivi de l'évolution des déformations au niveau des mêmes points que précédemment dans le mortier (point A) et dans le bois (point B) (Figure 4.38). En effet les déformations ϵ_{xx} restent inférieures à 0,4 % dans le bois et 0,2 % dans le mortier, ce qui correspond à peu près à celles de la figure 4.36 avant fissuration.

On remarquera aussi que les déformations ϵ_{yy} de l'ordre de 1 % au point B à la fin de l'essai (40 jours environ) sont importantes (Figure 4-38b). Ceci est prévisible du fait de la prise d'humidité du bois. On mesure une déformation de 0,4 % au point A, mais la déformation mesurée ne reflète pas la déformation du béton car celle-ci prend en compte les déformations des points voisins comme défini par le schéma d'intégration 2 (chapitre 2-Figure 2-16).

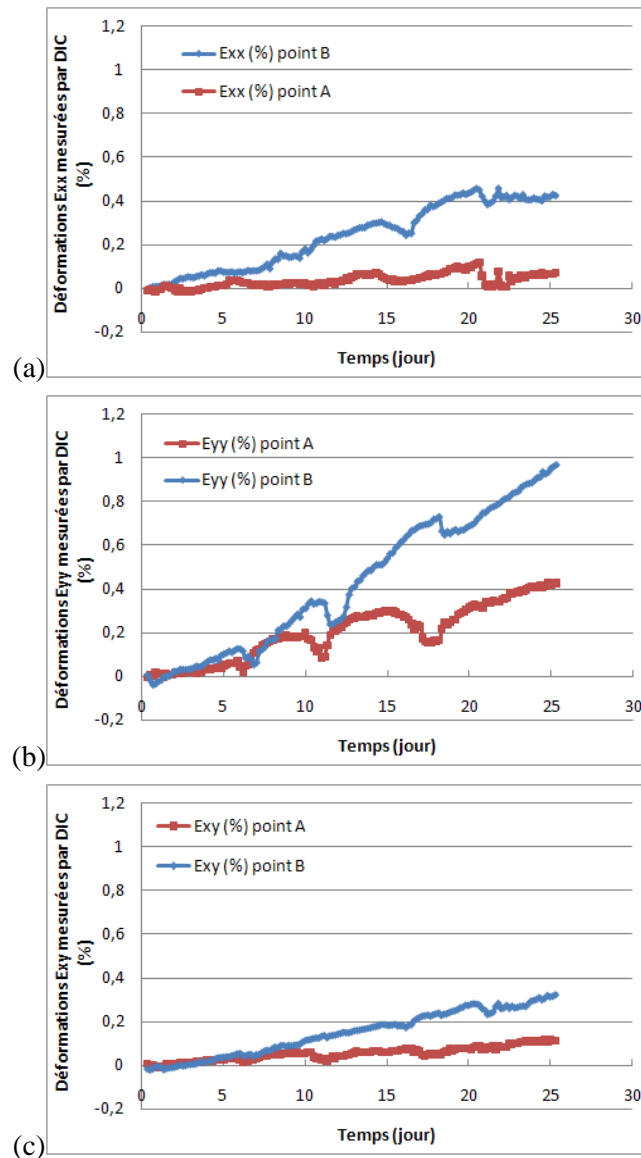


Figure 4-38 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ϵ_{xx} (b) ϵ_{yy} et (c) ϵ_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le mortier) et B (dans le bois) proches de l'interface épicea-mortier sens concave. Début des essais après une période de maturation du béton de 28 jours minimum.

4.2.2.3 Conclusion

En conclusion de cette partie, nous avons montré que :

- les tests de chargement hydrique à HR de 97 % conduisent, pour les deux configurations du bois, à l'absence de décollement (pour la durée des essais considérée et pour le champ macroscopique d'observation), mais à une fissuration du mortier pour la configuration convexe du bois ;
- les événements de type fissuration sont clairement observables en affichant les déformations en fonction du temps pour deux points proches de l'interface.

Dans le cas d'un ouvrage, le béton utilisé est un béton armé ou un béton à haute performance, dont les résistances, notamment en traction, sont bien supérieures à celles du mortier. Les phénomènes de retrait

empêché du bois observés dans le cas d'un béton peuvent donc être modifiés par rapport au cas d'un assemblage bois-mortier. Nous avons utilisé du BFUP lors des essais Push-Out et utiliserons donc ce même béton dans la suite des travaux. Par ailleurs pour affiner l'analyse, des observations sur des champs plus petits (1 cm) seront réalisées.

4.2.3 Série 3 : assemblages avec BFUP - tests sous HR=97 %

Les échantillons présentés dans cette partie sont soumis exactement aux mêmes conditions que celles de la série 2. Le BFUP est collé frais sur la colle préalablement appliquée sur le bois. Les échantillons sont ensuite placés dans un dessiccateur dont l'humidité relative est contrôlée à 60 % HR. Le béton est couvert de film plastique afin de limiter la dessiccation. Lorsque ceux-ci sont à l'équilibre à 60 % HR et que le béton est âgé de plus de 28 jours, l'échantillon est placé dans une enceinte dont l'HR est de 97 %. Cette troisième série d'essais est faite sur des échantillons bois d'épicéa-BFUP (Figure 4-39a et 4-39b). Les deux situations d'orientation convexe et concave des cernes sont étudiées. Un troisième échantillon douglas-BFUP a été testé dans les mêmes conditions (Figure 4.39c). L'analyse par corrélation d'images sur un champ de 9 cm prenant en compte l'échantillon complet sur l'image a été complétée par une analyse plus fine, au niveau de l'interface, sur un champ de 1 cm, et ce pour les trois configurations. Pour des raisons de possibilité de fabrication, deux BFUP ont été utilisés : le CERACEM et le Ductal que l'on précisera dans l'analyse.

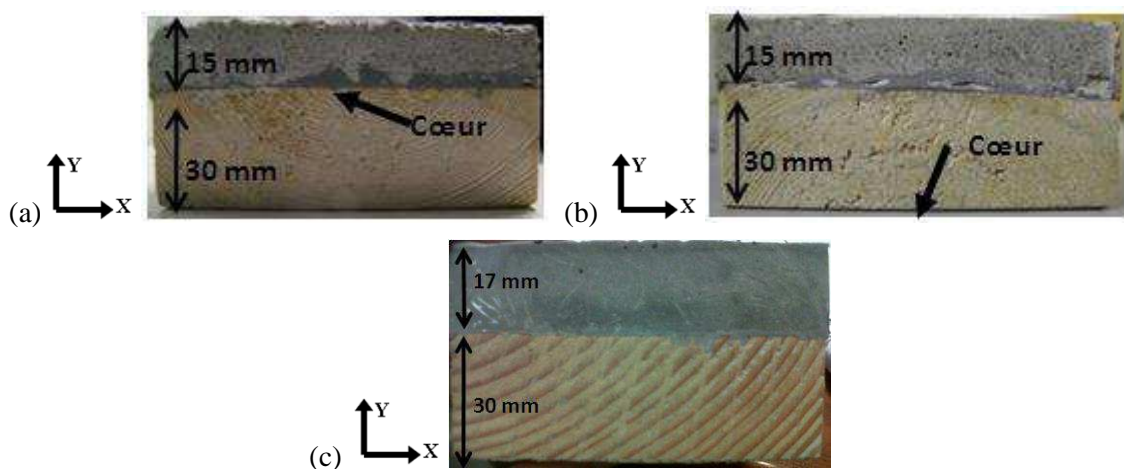


Figure 4-39 : Photos (a) échantillon bois épicéa-BFUP collé avec Sika 32LP, cernes convexes, (b) bois épicéa-BFUP collé, cernes concaves, (c) échantillon bois douglas-BFUP collé.

4.2.3.1 Épicéa-BFUP - Orientation convexe des cernes

Les déformations ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{eq} (déformations équivalentes de Von Mises) sont représentées sur la figure 4-40. En comparaison avec l'échantillon bois-mortier de la série 2, on constate que le BFUP (ici du CERACEM) fissure perpendiculairement au plan de collage au cœur de l'interface (Figure 4-40a), mais la fissure apparaît légèrement plus tardivement (visible après 12 jours de chargement hydrique pour le cas du BFUP contre sept jours pour le cas de l'assemblage bois-mortier). De même on observe dans le bois en

zone centrale proche de l'interface, des déformations de l'ordre de 0,3 à 0,4 %, qui traduisent un relâchement des contraintes liées à la rigidité de l'interface qui empêchaient les déformations libres du bois.

L'observation des composantes ε_{yy} montre les déformations positives de l'ordre de 0,4 % dans le bois qui atteignent la zone interfaciale. L'analyse d'images avec un champ de 9 cm ne permet pas de conclure à un décollement du plan de collage au niveau de l'interface (Figure 4-40b).

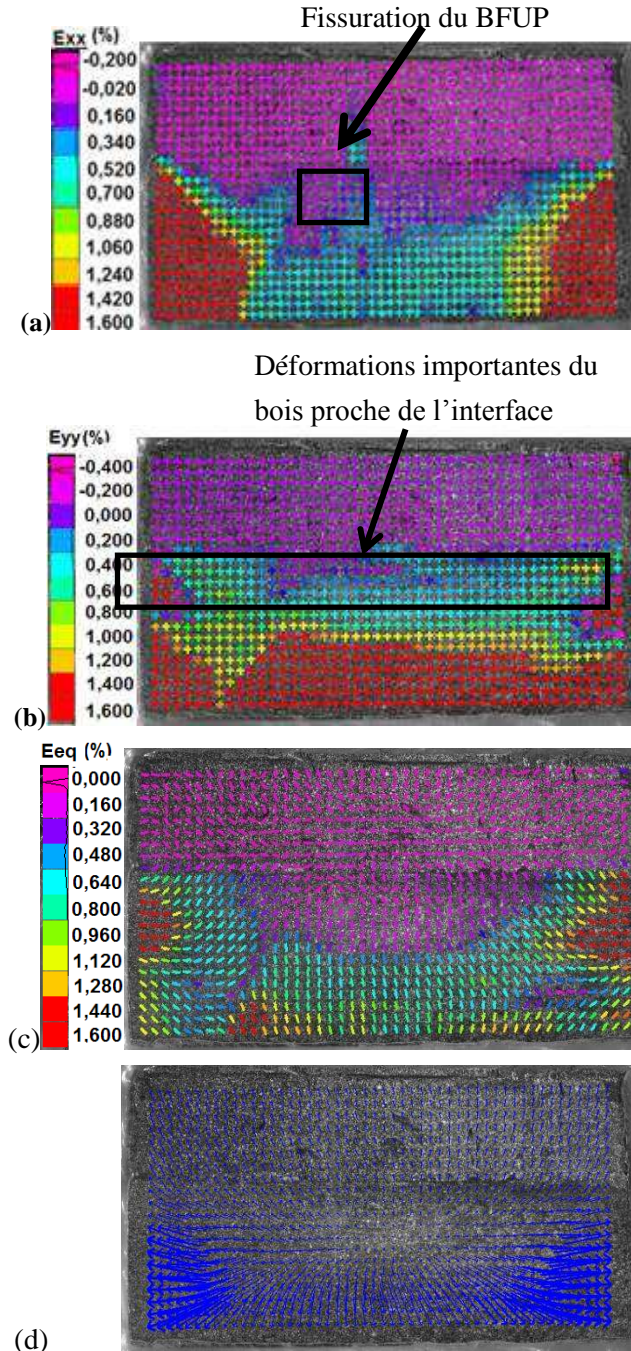


Figure 4-40 : Échantillon épicéa-BFUP sens convexe après 12 jours de chargement sous HR=97 %, cartes obtenues juste après fissuration (a) déformations ε_{xx} , (b) déformations ε_{yy} , (c) déformations ε_{eq} et (d) déplacements.

Le suivi des déformations dans le temps aux deux points A et B de part et d'autre de l'interface comme représenté sur la figure 4-41 confirme ces observations.

La fissuration du BFUP est tout à fait cohérente avec le comportement de ce matériau. En effet, les fibres d'un BFUP n'augmentent pas le seuil de fissuration de la matrice, mais lui apporte un comportement écouissant post fissuration, conformément à la figure 1-21 du chapitre 1. La fissuration du BFUP ne l'empêche pas de jouer un rôle structurel, comme on le voit sur les figures 4.41a et 4-42 dans lesquelles

sont reportées les déformations en deux points de part et d'autre de l'interface, au cours du temps. Une fois la fissuration produite, les déformations ϵ_{xx} sont limitées à 1 % grâce à la reprise d'efforts de traction par les fibres, alors qu'en comparaison, celles du mortier ordinaire sont au moins triplées (Figure 4-43). Les déformations ϵ_{yy} (Figure 4-37b) de l'ordre de 2 % au point B dans le bois à la fin de l'essai (40 jours environ) sont importantes du fait de la prise d'humidité du bois. La déformation mesurée au point A dans le béton est négligeable (remarquons que dans cette analyse, le point A est positionné dans le béton un peu plus loin de l'interface que dans le cas précédent).

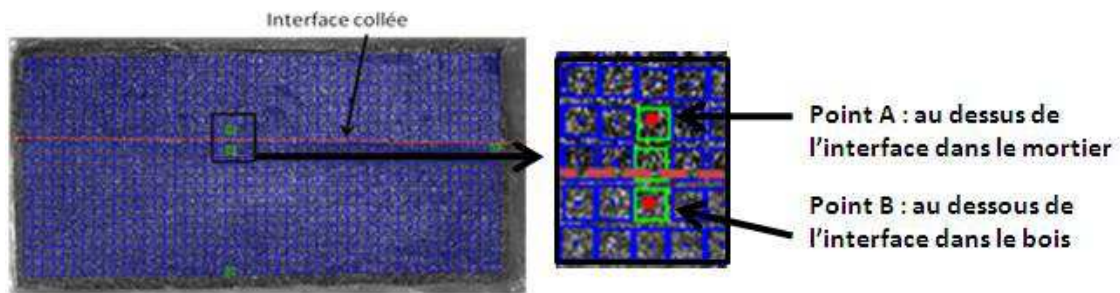


Figure 4-41 : Représentation des deux points suivis dans le temps par la technique de corrélation d'images pour l'échantillon épicea-BFUP avec le cœur du bois au niveau de l'interface collée.

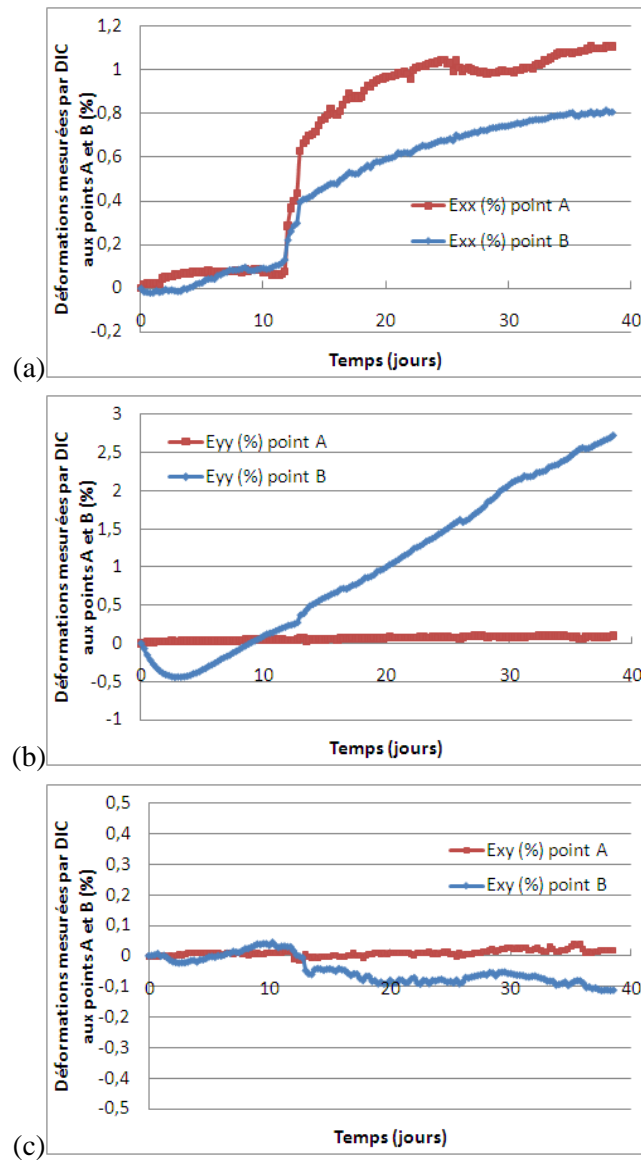


Figure 4-42: Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ϵ_{xx} (b) ϵ_{yy} et (c) ϵ_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le BFUP) et B (dans le bois) proches de l'interface comme représentés en figure 4-32 pour l'échantillon épicea-BFUP. Début des essais après une période de maturation du béton de 28 jours minimum.

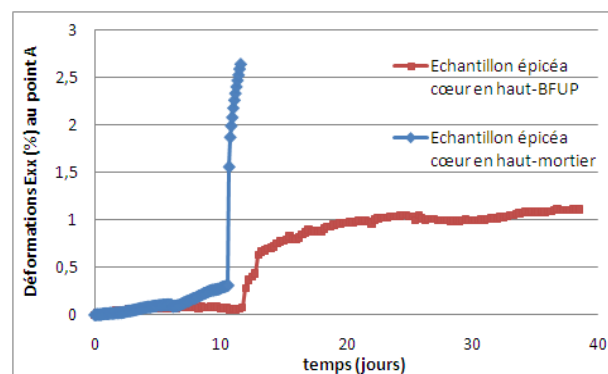


Figure 4-43 : Évolution des déformations ϵ_{xx} au point A des échantillons épicea-mortier et épicea-BFUP.

L'analyse plus fine au niveau de l'interface avec l'observation de champs d'environ 1 cm (figure 4-44), sur un autre échantillon épicea-BFUP dont le BFUP est cette fois-ci le Ductal, a permis de préciser le comportement à l'interface de l'assemblage collé bois-BFUP et de compléter l'étude en vérifiant les phénomènes de dégradation observés.

Les cartes de déformations ϵ_{xx} montrent qu'il n'apparaît pas, au niveau du BFUP, de fissures perpendiculaires à l'interface après trois semaines de chargement hydrique (Figure 4-45) ce qui peut être dû au fait que nous n'avons pas utilisé le même BFUP dans les deux cas, ceux-ci n'ayant pas exactement les mêmes résistances à la traction. En revanche, les cartes de déformations ϵ_{yy} , montrent que les déformations du bois induites par la prise d'humidité occasionnent dans cette configuration, d'une part de la compression aux bords droit et gauche de l'interface ($\epsilon_{yy} < 0\%$) (Figures 4-46a et 4-46d) et un décollement de l'interface bois-colle au cœur de l'interface ($\epsilon_{yy} > 2,4\%$) (Figure 4-46c). Cette fissure parallèle au plan de l'interface n'est pas visible sur l'observation macroscopique (champs de 9 cm) car celle-ci est masquée par les déformations importantes du bois observées proches de l'interface. Ce comportement coïncide bien avec la courbure observée pour le gonflement libre du bois (Figure 4-20 et 4-22a).

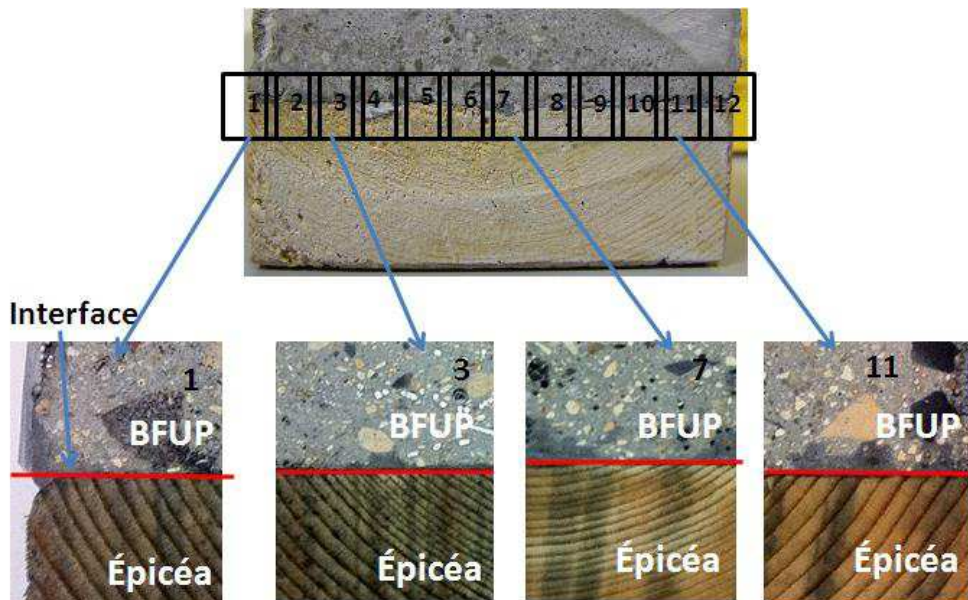


Figure 4-44 : Fenêtres observées par DIC de l'échantillon épicea-BFUP sens convexe.

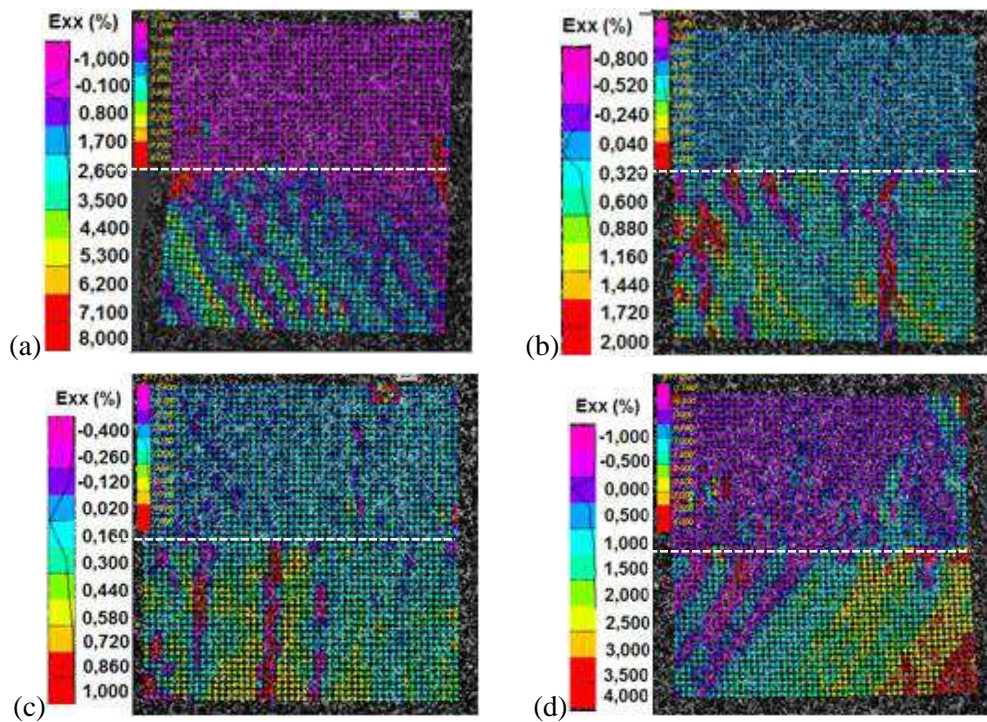


Figure 4-45 : Cartes de déformations ε_{xx} , échantillon épicea-BFUP sens convexe, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 11 représentées figure 4-43.

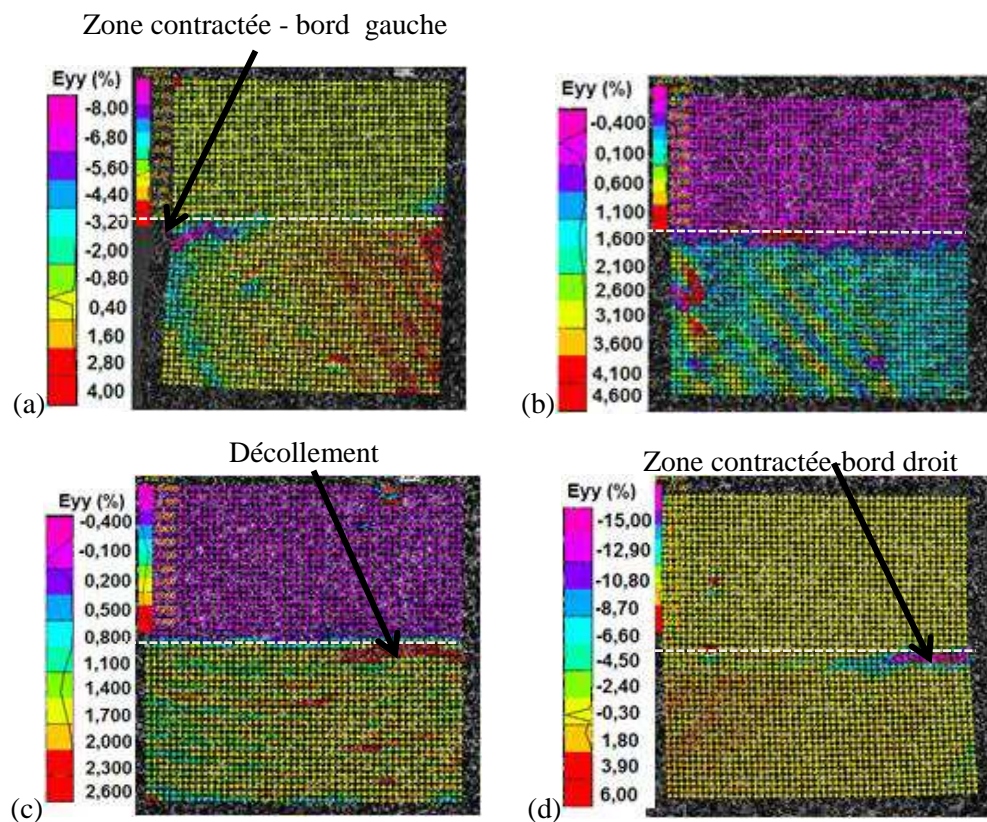


Figure 4-46 : Cartes de déformations ε_{yy} , échantillon épicea-BFUP sens convexe, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 11 représentées figure 4-43.

4.2.3.2 Épicéa-BFUP - sens concave des cernes

Les déformations ϵ_{xx} , ϵ_{yy} et ϵ_{eq} (déformations équivalentes de Von Mises) avec un champ de l'image de 9 cm sont représentées sur la figure 4-47. De la même façon que pour le cas de l'échantillon épicéa-mortier sens concave, nous n'observons pas de fissuration dans le BFUP (ici du CERACEM) après 21 jours de chargement sous HR=97 % (Figure 4-47a). Nous ne pouvons pas conclure à un décollement de l'interface bois-BFUP à cette échelle du fait de déformations ϵ_{yy} importantes dans le bois (0,9 %) qui s'étendent jusqu'à l'interface et qui peuvent masquer une éventuelle rupture interfaciale (Figure 4-47b).

Le suivi de l'évolution des déformations (Figure 4-49) au niveau des points A (dans le BFUP) et B (dans le bois) (Figure 4-48) valide ces observations. Les déformations ϵ_{xx} restent inférieures à 0,4 % au point B et à 0,2 % au point A comme nous l'avons remarqué précédemment pour le cas de l'assemblage bois-mortier sens concave (Figure 4-50).

On remarquera aussi que les déformations ϵ_{yy} de l'ordre de 2 % aux deux points B à la fin de l'essai (40 jours environ) sont importantes (Figure 4-49b). Ceci est prévisible du fait de la prise d'humidité du bois. Au point A, les déformations dans le béton sont négligeables.

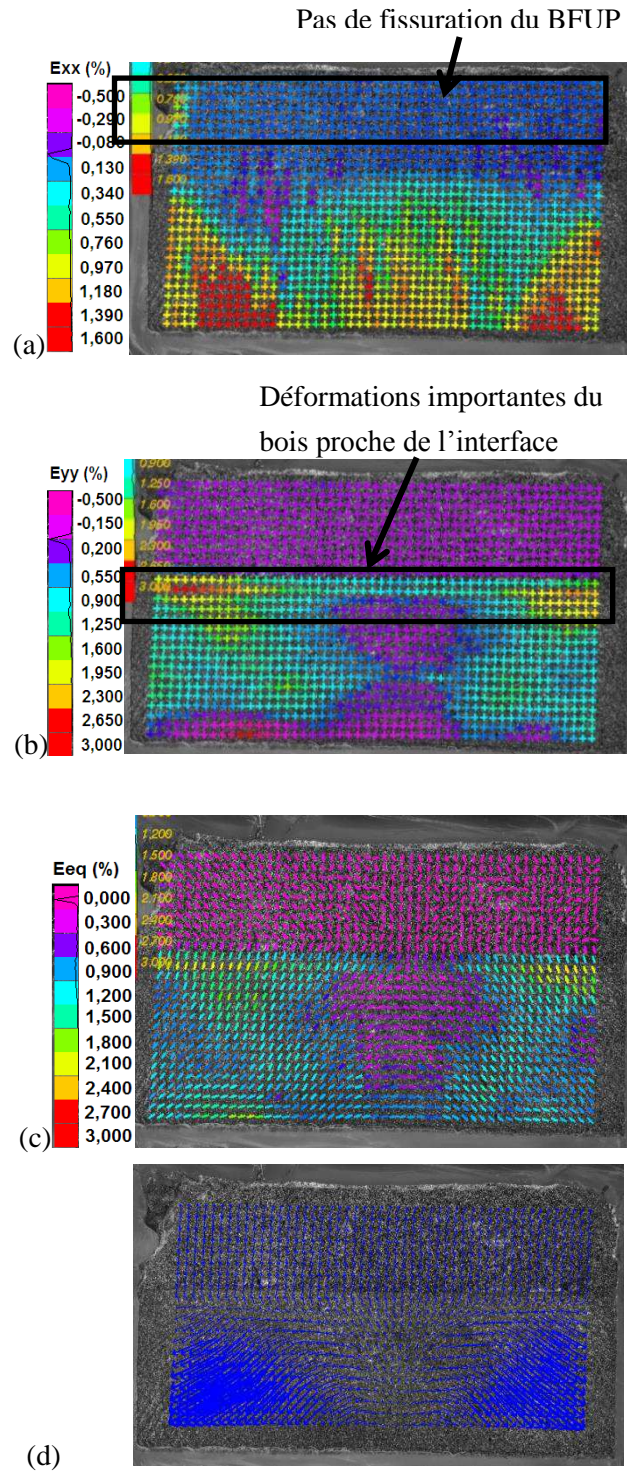


Figure 4-47 : Échantillon épicea-BFUP sens concave après 21 jours de chargement sous HR=97 %, (a) carte de déformations ϵ_{xx} , (b) carte de déformations ϵ_{yy} , (c) carte de déformations ϵ_{eq} et (d) carte de déplacements.

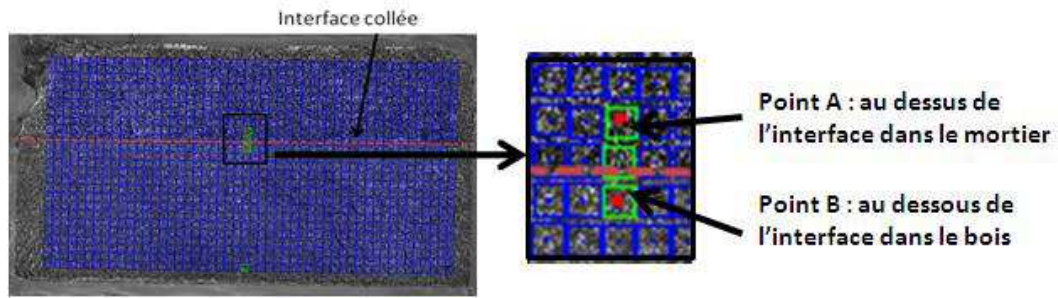


Figure 4-48 : Représentation des deux points A et B suivis dans le temps pour l'échantillon épicea-BFUP sens concave par DIC.

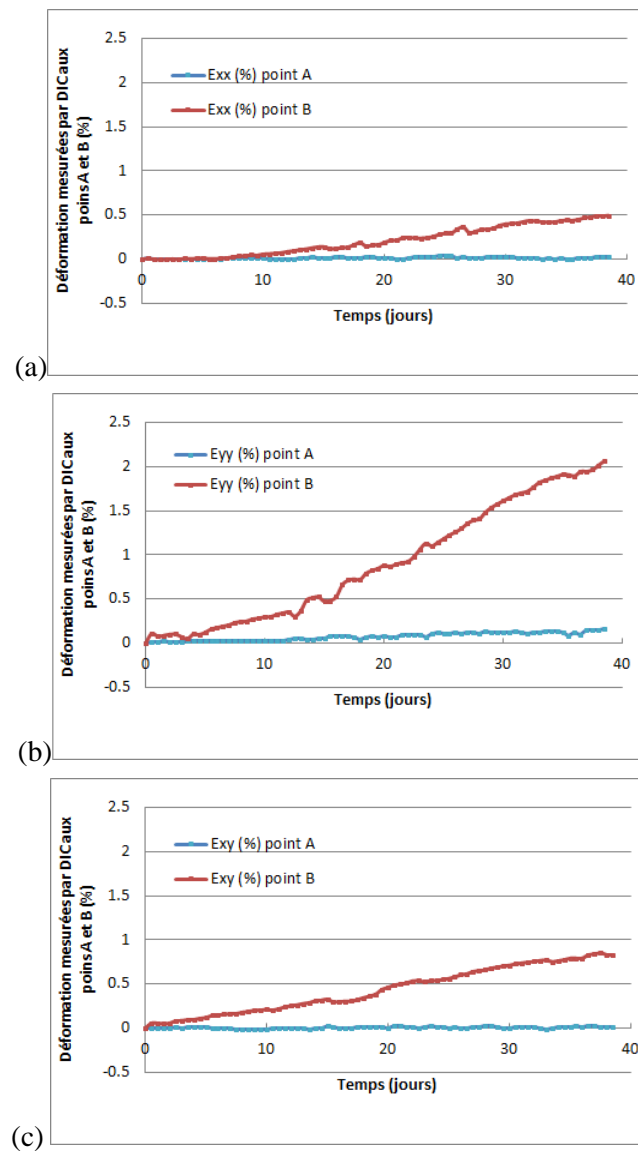


Figure 4-49 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le BFUP) et B (dans le bois) proches de l'interface pour l'échantillon épicea-BFUP sens concave.

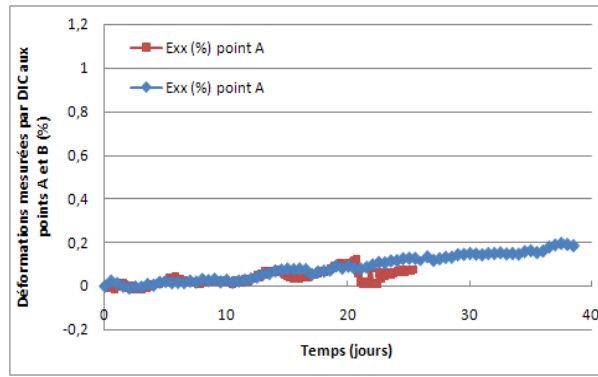


Figure 4-50 : Évolution des déformations ε_{xx} au point A (dans le matériau cimentaire) des échantillons épicea-mortier et épicea-BFUP sens concave.

L'analyse de champs de 1 cm s'est faite sur un autre échantillon fabriqué dans la même configuration mais avec du Ductal (Figure 4-51). Celle-ci valide les remarques avancées lors de l'observation macroscopique, *i.e* qu'aucun endommagement n'est observable au niveau de l'interface dans le béton, à une échéance de 21 jours (Figure 4-52). De plus, les cartes de déformations ε_{yy} montrent de la contraction au centre de l'interface mais aucun décollement sur les bords (Figure 4-53).

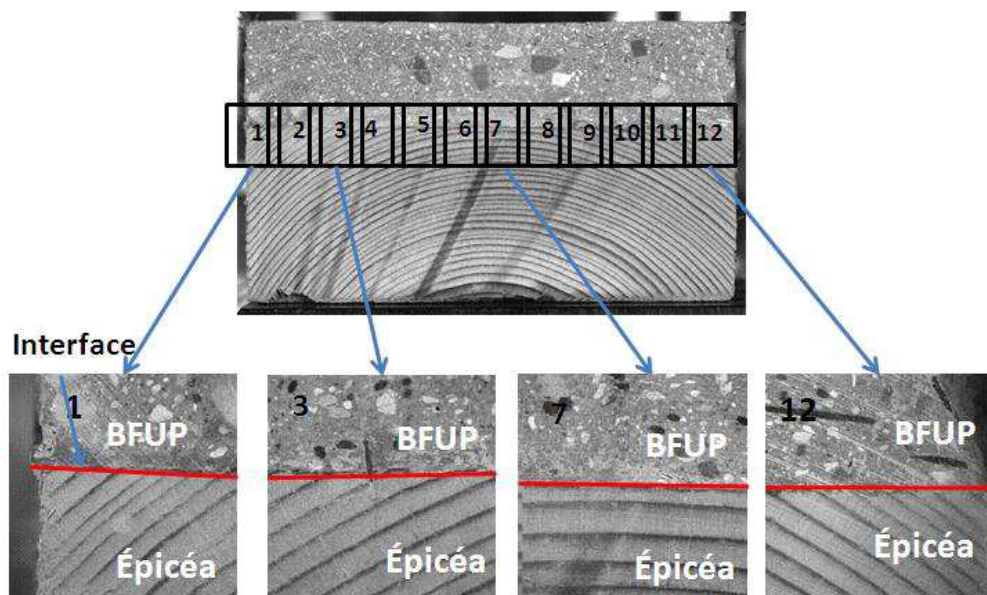


Figure 4-51 : Fenêtres observées par DIC de l'échantillon épicea-BFUP sens concave.

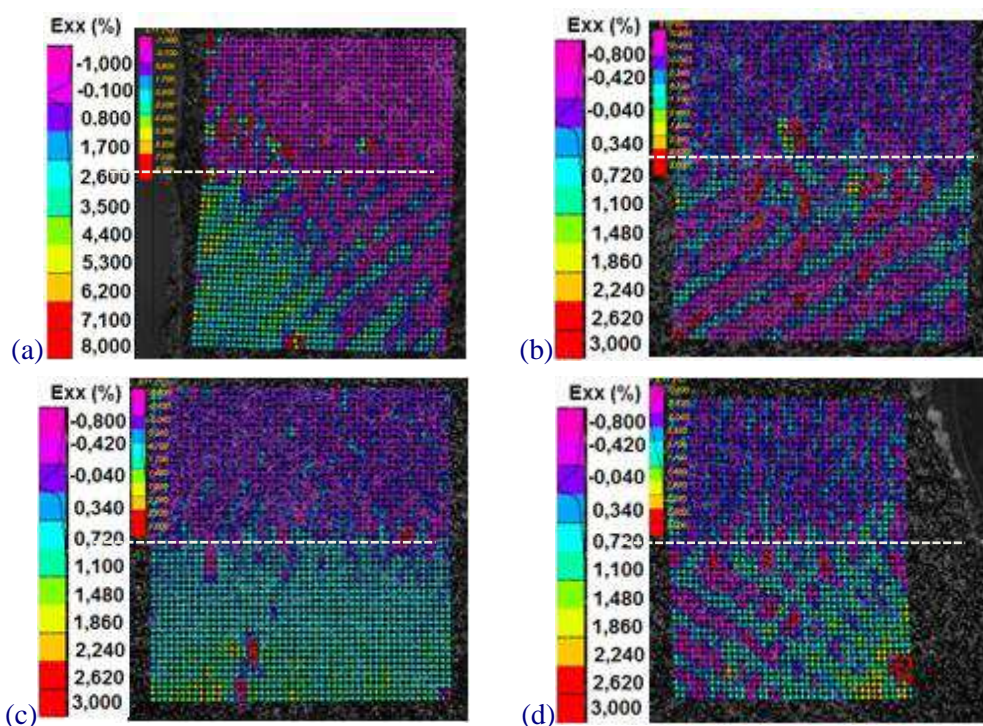


Figure 4-52 : Cartes de déformations ε_{xx} , échantillon épicea-BFUP sens concave, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 12 représentées figure 4-50.

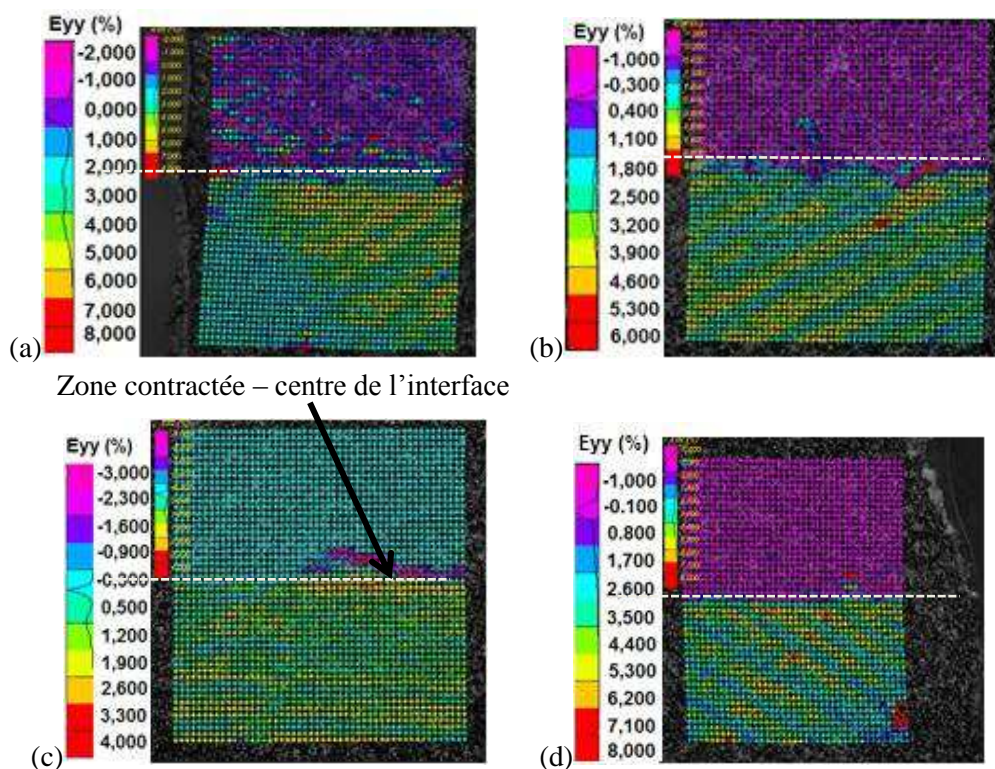


Figure 4-53 : Cartes de déformations ε_{yy} , échantillon épicea-BFUP sens concave après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 12 représentées figure 4-50.

4.2.3.3 Douglas-BFUP

Les déformations ε_{xx} , ε_{yy} et ε_{eq} de l'échantillon douglas-BFUP (Ductal) (Figure 4-54), mesurées sur le champ macroscopique, ne montrent pas de dégradation du béton et de l'interface à une échéance de 30 jours.

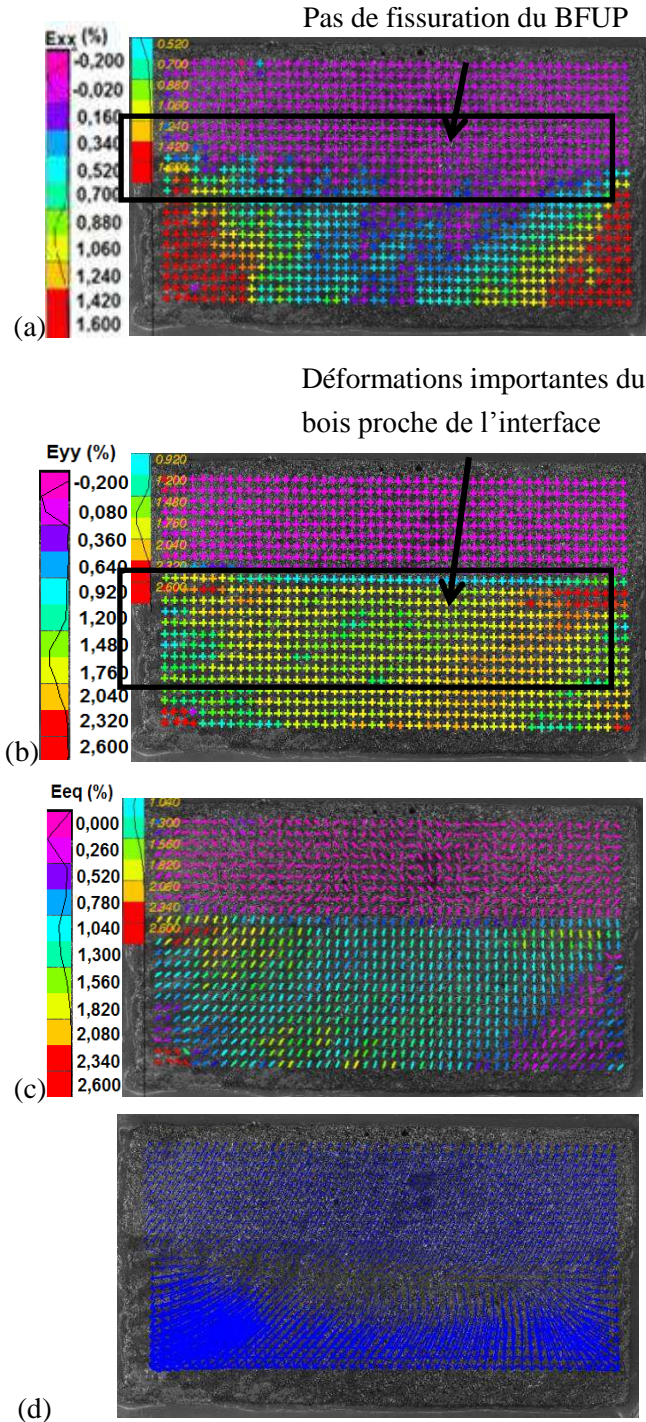


Figure 4-54 L'échantillon douglas-BFUP collé après 30 jours de chargement sous HR=97 % : (a) carte de déformations ε_{xx} , (b) carte de déformations ε_{yy} , (c) carte de déformations ε_{eq} et (d) carte de déplacements.

Le suivi temporel des déformations (Figure 4-56) aux deux points A et B (Figure 4-55) coïncide avec ces observations. Les déformations ε_{xx} restent inférieures à 0,4 % dans le bois et sont quasi nulles dans le BFUP (Figure 4-56a). Les déformations ε_{yy} importantes dans le bois, de l'ordre de 2 % à la fin de l'essai (Figure 4-56b) sont dues à la prise d'humidité du bois.

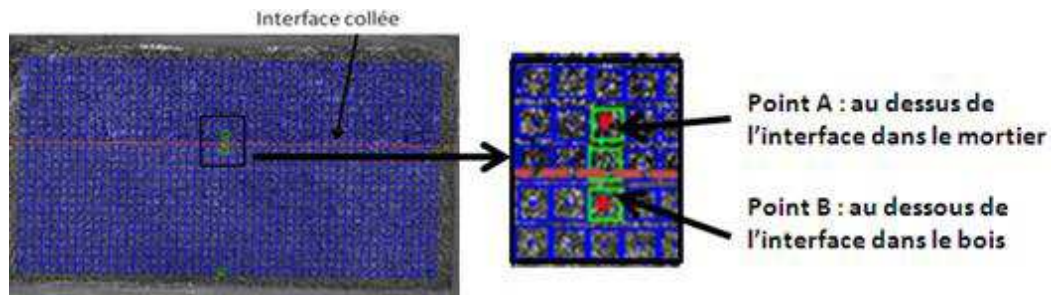


Figure 4-55 : Représentation des deux points A et B suivis dans le temps pour l'échantillon épicea-BFUP sens concave, par DIC.

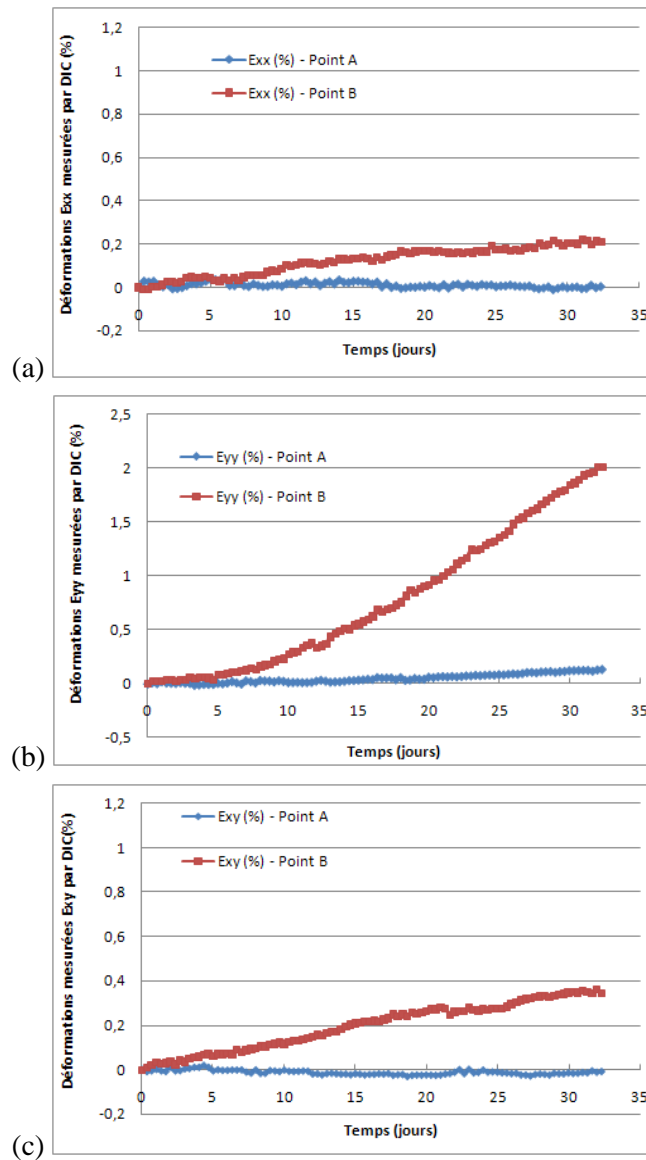


Figure 4-56 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ϵ_{xx} (b) ϵ_{yy} et (c) ϵ_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le BFUP) et B (dans le bois) proches de l'interface comme représentés en figure 4-54 pour l'échantillon épicea-BFUP collé avec le cœur du bois en bas, au niveau de la face inférieure.

L'échantillon analysé avec un champ de 1 cm a été fabriqué avec la même colle et la même gâchée de béton (Ductal). Les cartes de déformations ϵ_{xx} et ϵ_{yy} obtenues à l'échelle de l'interface (avec un champ de 1 cm) sont présentées par les figures 4-58 et 4-59. On remarquera que l'interface n'est pas parfaitement horizontale aux bords de l'interface en liaison avec des complications lors de la découpe du bois de douglas.

Les cartes de déformations ϵ_{xx} montrent que dans cette configuration, le BFUP ne fissure pas après 30 jours de chargement hydrique (Figure 4-58). En revanche, les déformations ϵ_{yy} montrent un décollement du bord gauche de l'interface douglas-colle (Figures 4-59a et 4-59b). Le décollement de l'interface est observable sur les cartes de déformations dès 9 h après le début du chargement hydrique (Figure 4-60). Si

on compare ces phénomènes avec le gonflement libre du bois (Figure 4-22b), ceux-ci sont prévisibles du fait d'un gonflement plus important du bois à droite qu'à gauche de l'échantillon.

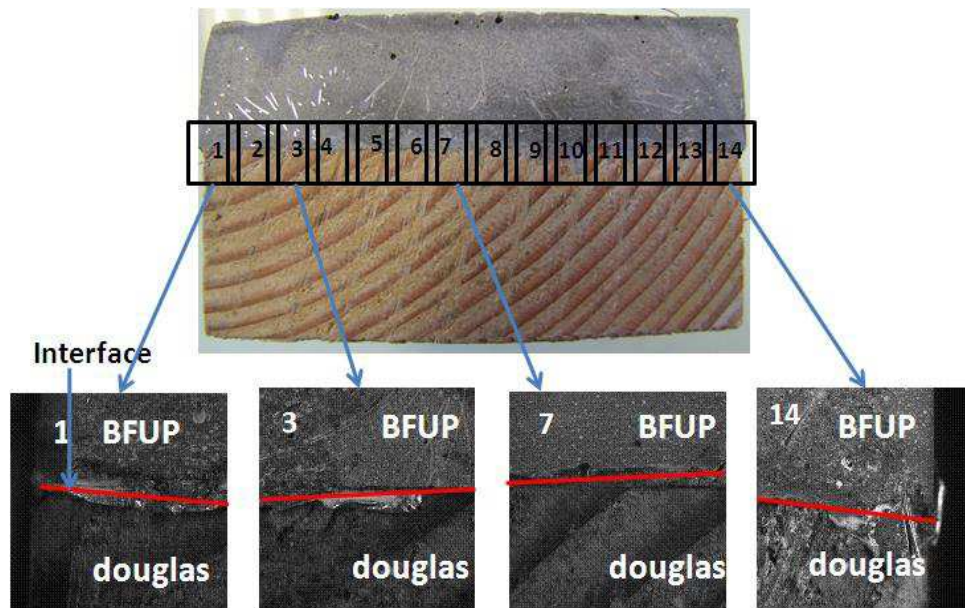


Figure 4-57 : Fenêtres observées par DIC de l'échantillon douglas-BFUP.

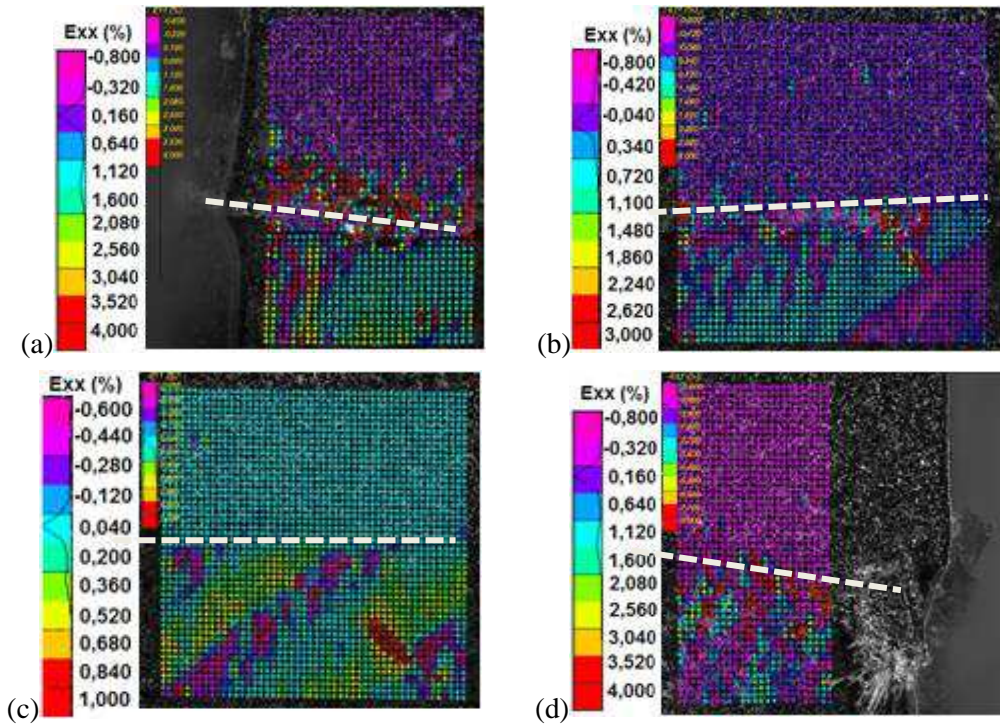


Figure 4-58 : Cartes de déformations ε_{xx} , échantillon douglas-BFUP après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 14.

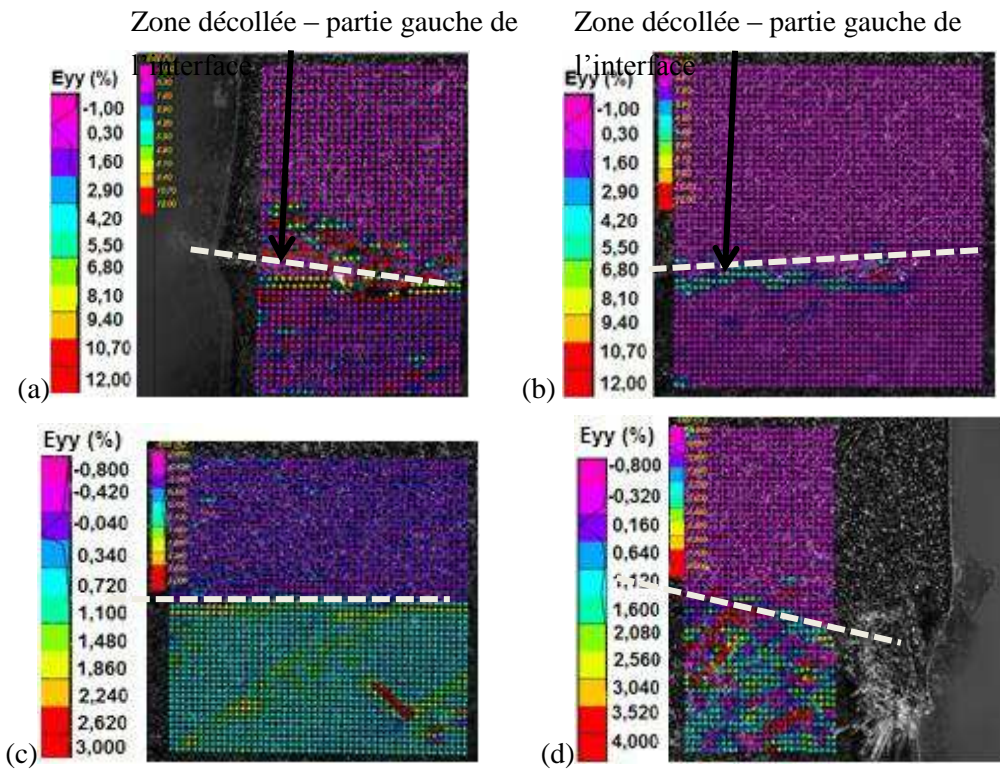


Figure 4-59 : Cartes de déformations ε_{yy} , échantillon douglas-BFUP, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 14.

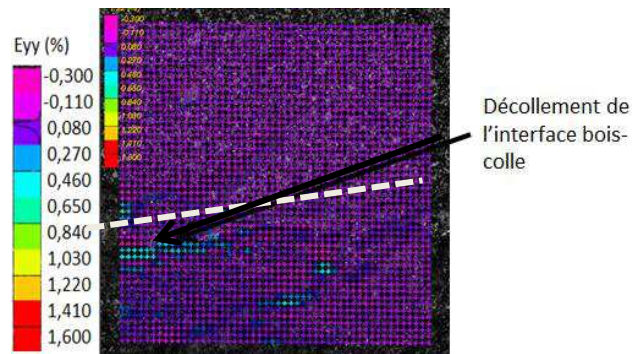


Figure 4-60 : Cartes de déformations ϵ_{yy} , échantillon douglas-BFUP après 9 h de chargement hydrique (fenêtre 3).

4.2.3.4 Conclusion

En conclusion de cette partie, nous avons montré que :

- les tests sous HR de 97 %, conduisent à l'absence de fissuration du BFUP pour deux configurations de bois : le douglas avec une orientation inclinée des cernes, et l'épicéa avec une orientation concave ;
- dans le cas où les cernes de l'épicéa sont positionnés dans le sens convexe, le matériau cimentaire (BFUP ou mortier) peut fissurer ;
- les événements de type fissuration sont clairement observables en affichant les déformations ϵ_{xx} en fonction du temps de deux points proches de l'interface.
- l'observation plus fine de champs de 1 cm permet de compléter l'étude et d'observer des phénomènes non observables avec l'analyse d'un champ de 9 cm. Dans le cas des assemblages épicéa convexe-BFUP et douglas-BFUP, on observe un décollement de l'interface. Ce décollement est localisé au niveau de l'interface bois-colle ;
- les échantillons épicéa sens concave-BFUP n'ont pas été endommagés par les chargements hydriques. Le sens des cernes du bois par rapport au plan de collage a donc une influence importante sur l'endommagement de l'assemblage collé soumis à des chargements hydriques. La configuration pour laquelle les cernes du bois sont dans le sens concave par rapport au plan de collage est la moins défavorable pour la structure.

4.2.4 Série 4 : Essais complémentaires

Deux configurations supplémentaires ont été analysées afin de vérifier si les endommagements peuvent être évités pour les configurations les moins favorables.

4.2.4.1 Épicéa sens convexe avec rainures-BFUP

Cet essai a pour objectif d'analyser les effets d'un rainurage perpendiculaire à l'interface du bois. Ces principes sont bien connus des charpentiers lorsqu'ils cherchent à localiser une fissure (rainures dans les clins de bardage, etc.).

L'échantillon testé est un assemblage épicéa-BFUP (Ductal). Le bois est collé au BFUP dans le sens convexe des cernes qui est le moins favorable, et nous avons réalisé au niveau de la face à encoller des rainures (Figure 4-61). Nous avons rempli ces rainures d'un matériau souple (silicone) dans le but de diminuer les contraintes induites par les déformations empêchées du bois au niveau de l'interface collée. La colle utilisée est l'Époxy Sikadur 32LP, et le béton a été coulé directement sur la colle non polymérisée.

L'échantillon est soumis exactement aux mêmes conditions que celles imposées lors des essais précédents c'est-à-dire à 97 % d'humidité relative, à 20°C (+ ou - 1°C).

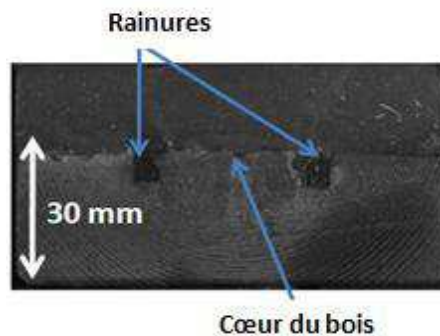


Figure 4-61 : Face observée par DIC de l'échantillon épicéa sens convexe avec rainures –BFUP.

Les figures 4-62 et 4-63 présentent les cartes de déformations ε_{xx} , ε_{yy} , et ε_{eq} après 12 jours de chargement hydrique. On peut comparer cet essai (épicéa sens convexe avec rainure-BFUP) à l'essai précédent effectué sur un échantillon épicéa sens convexe sans rainures-BFUP pour lequel le béton a fissuré perpendiculairement au plan de collage (§4.2.3a), Figure 4-40). On observe que :

- l'allure générale des cartes de déformations ε_{xx} et ε_{yy} est différente au niveau du bois ;
- sur les cartes de déformations ε_{xx} dans le bois proche de l'interface, des zones de déformations négatives quasi nulles sont observables à proximité des rainures, tandis que dans le cas « sans rainures », les déformations sont empêchées au niveau de l'interface et sont nulles au cœur de l'échantillon de bois, tant que le béton n'a pas fissuré ;
- nous n'observons pas de fissuration du BFUP (Figure 4.62a) dans ce cas. La réalisation de rainures dans le bois semble avoir pour effet de réduire les contraintes dans la direction x induites au niveau de l'interface par le gonflement empêché du bois. On ne peut pas conclure quant au décollement comme pour les cas étudiés précédemment du fait de déformations importantes du bois en zone proche de l'interface (Figure 4-62b).

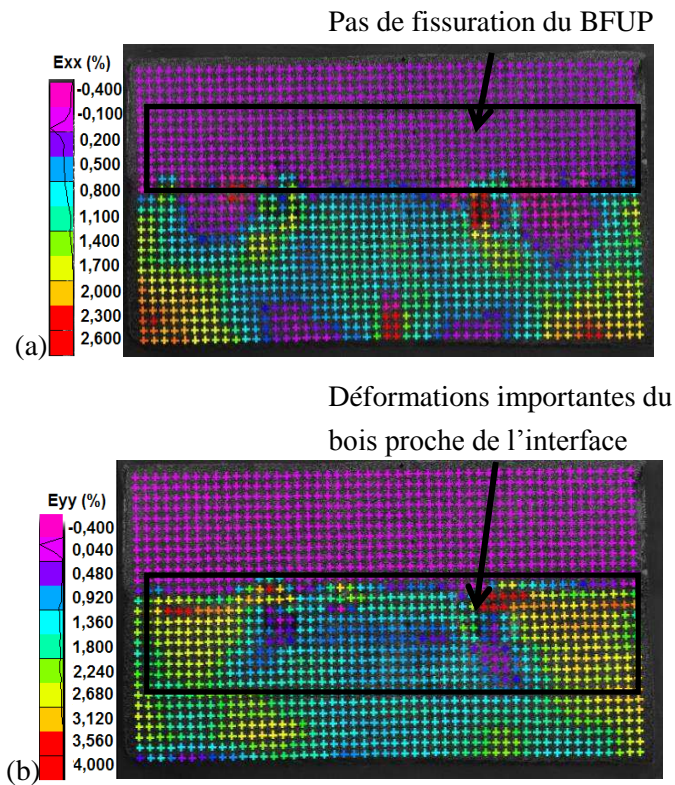


Figure 4-62 : Cartes de déformations locales de l'échantillon épicéa sens convexe avec rainures (après 12 jours de chargement sous HR=97 % (a) ε_{xx} , (b) ε_{yy}).

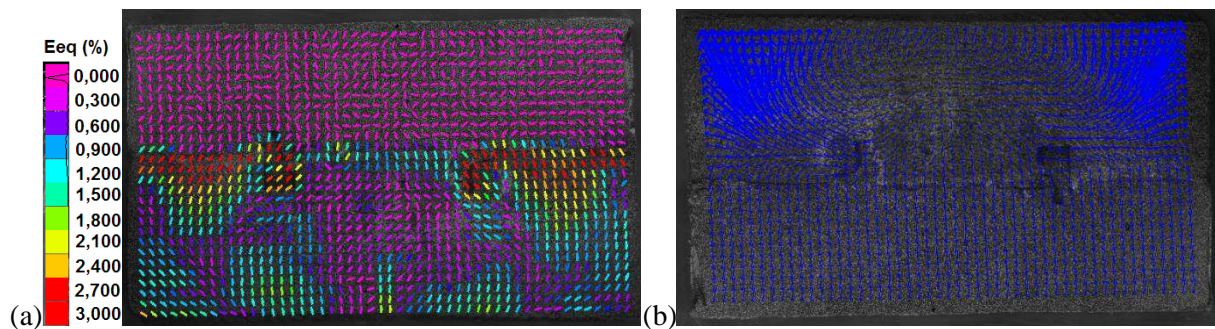


Figure 4-63 : (a) Déformations équivalentes au sens de Von Mises et (b) carte de déplacements après 12 jours de chargement hydrique de l'échantillon épicéa sens convexe avec rainures.

4.2.4.2 Douglas toutes lamelles-BFUP

Il s'agit dans cette configuration d'analyser le comportement d'un échantillon douglas-BFUP collé avec la Sikadur LP32. Le douglas utilisé n'est pas découpé sur la hauteur, il est constitué de toutes les lamelles du lamellé-collé tel qu'il est vendu dans le commerce, soit 90 mm de hauteur de bois, une hauteur trois fois supérieure à celles des bois utilisés pour les échantillons précédents (Figure 4-64).

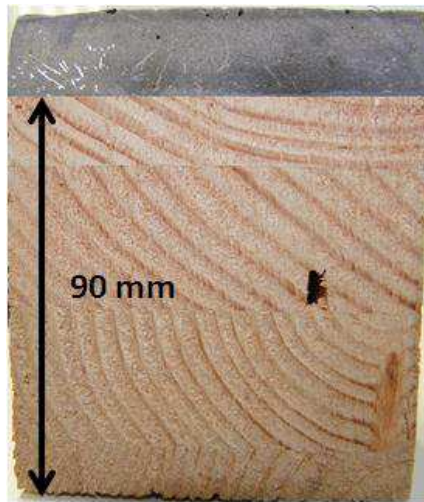


Figure 4-64 : Échantillon douglas toutes lamelles-BFUP.

Les cartes de déformations ε_{xx} , ε_{yy} , et ε_{eq} après 30 jours de chargement hydrique sont représentées par les figures 4-65 et 4-66 :

- les déformations ε_{xx} , ε_{yy} , et ε_{eq} au cœur du bois sont quasi nulles, l'eau semble ne pas avoir diffusé au cœur du bois après un mois de chargement hydrique ; On n'observe pas de déformations localisées dans le béton, celui-ci n'a pas fissuré après 30 jours de chargement hydrique ;
- on observe des déformations ε_{yy} importantes à proximité de l'interface de l'ordre de 1 %, mais, on ne peut pas conclure à un décollement comme pour les essais précédents.

Cet essai montre que la réponse à la sollicitation hydrique dépend de la taille des échantillons. La durée de l'essai n'a probablement pas été suffisante pour mettre en évidence des endommagements.

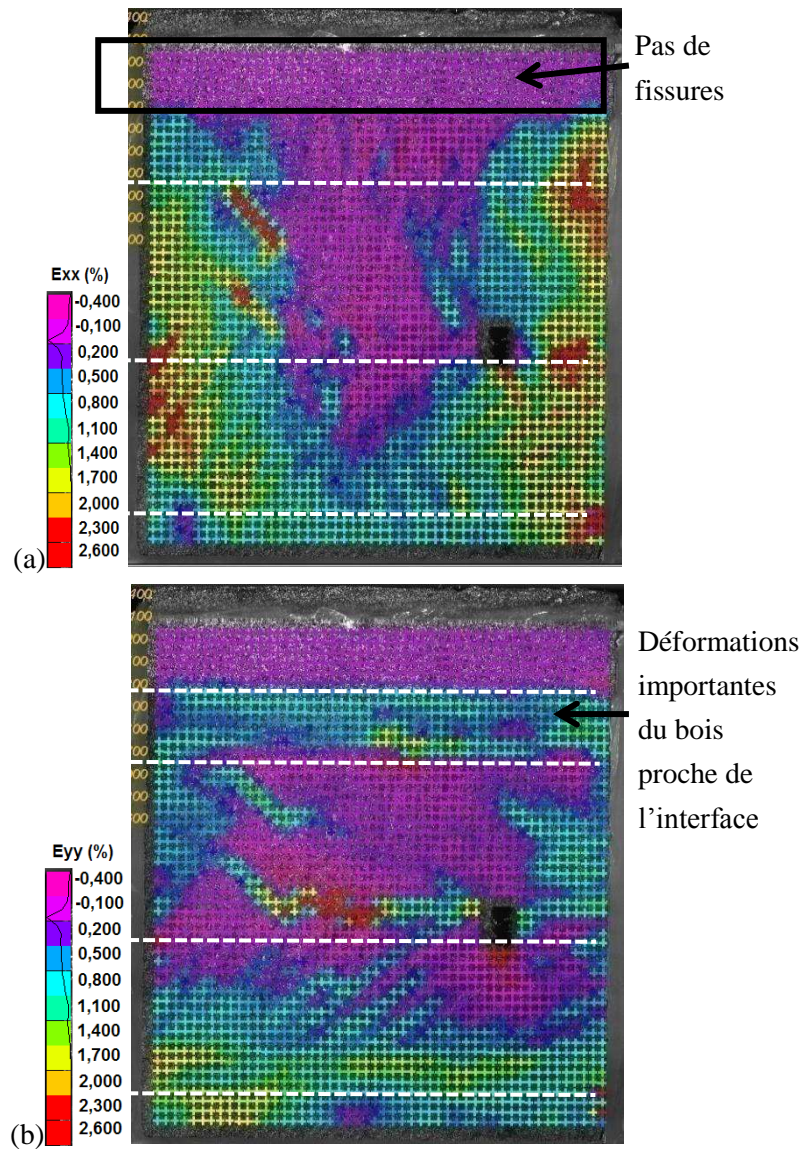


Figure 4-65 : Cartes de déformations locales de l'échantillon douglas toutes lamelles-BFUP collé, après 30 jours de chargement sous HR=97 % (a) composante XX des déformations, (b) composante YY des déformations.

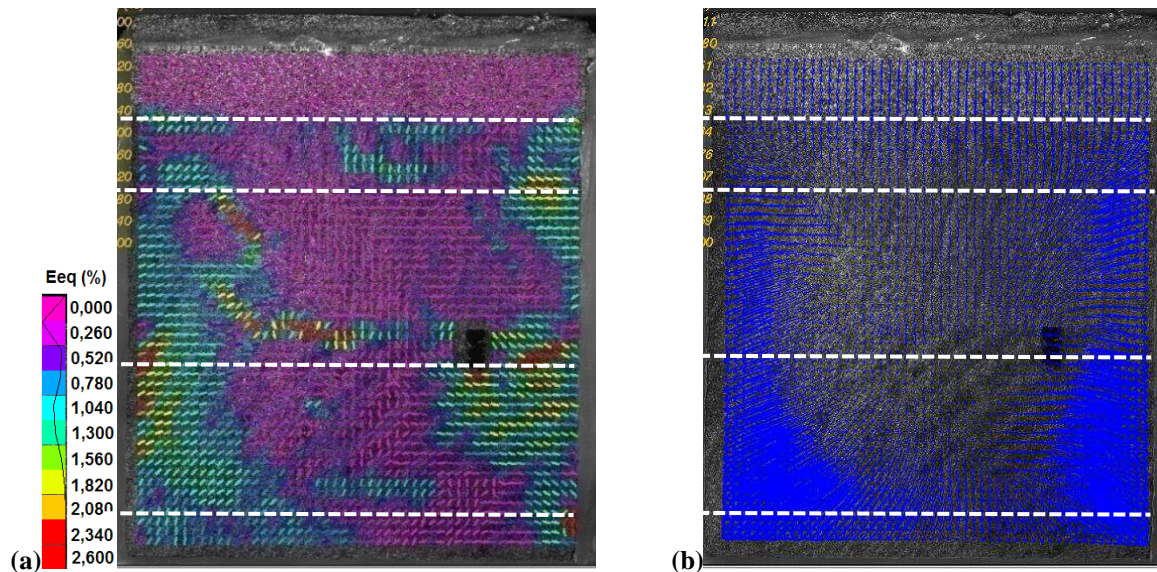


Figure 4-66 : Carte des déformations équivalentes au sens de Von Mises et (b) carte de déplacement de l'assemblage douglas toutes lamelles-BFUP à 30 jours de chargement hydrique.

4.3 Conclusion

Les travaux présentés dans ce chapitre représentent une part importante des travaux menés au cours de la thèse. L'objet de ce chapitre est de comprendre le comportement hydromécanique d'un assemblage bois-béton en repérant les types de dommages observables sur l'assemblage soumis à des chargements hydriques notamment au niveau de l'interface, et en expliquant à quels phénomènes sont liés ces endommagements. Pour cela, nous avons mis au point deux types de tests de chargement hydrique :

- un test en situation hydrique sévère, l'imbibition. Celui-ci a permis d'identifier les mécanismes d'endommagement possibles d'un assemblage. Ces tests ont été réalisés pour confirmer le choix de la colle utilisée, et émettre les premières conclusions concernant l'effet de la géométrie (le sens des cernes du bois) sur l'endommagement d'un assemblage ;
- un test de chargement hydrique plus réaliste à HR=97 % pendant au minimum trois semaines d'un assemblage à l'équilibre à HR=60 %.

Pour atteindre nos objectifs, nous avons d'abord validé l'utilisation de la technique de corrélation d'images sur les deux types de tests de chargement hydrique. L'outil a été utilisé pour quantifier les déformations dans l'assemblage et évaluer précisément les zones endommagées.

De nombreux essais ont ensuite été réalisés pour les deux types de chargement : « imbibition » et « humidité relative » sur des échantillons de bois seul et sur des assemblages bois-béton collés.

(1) Par les tests d'imbibition de la série d'essais 1, nous avons montré que :

- les mécanismes de dégradation pour l'adhésif époxy et acrylique modifiée sont comparables : le sens des cernes a un effet sur l'endommagement de l'assemblage. Aucune dégradation n'est visible sur les cartes de déformations obtenues par DIC pour le cas où le bois est collé dans le sens

concave. Deux mécanismes d'endommagement sont observables pour le cas où le bois est collé dans le sens convexe des cernes : le décollement qui démarre au centre de l'interface et la fissuration du mortier, perpendiculairement au plan de collage ;

- la colle polyuréthane est inadaptée du fait de décollements observés, quel que soit le sens du collage (convexe ou concave) et ceci très rapidement. Cette résine possède de très mauvaises propriétés d'adhérence sur le bois, ce qui a déjà été montré au chapitre 3, lors des essais de cisaillement.
- (2) Les tests de chargement sous 97 % d'humidité relative des séries d'essais 2 et 3 avec l'adhésif époxy ont montré que :
- les mêmes mécanismes d'endommagement que pour les tests d'imbibition sont observables : Dans le cas où le bois est collé dans le sens convexe des cernes, on observe de la fissuration dans le mortier ou le BFUP perpendiculaire au plan de collage, ainsi qu'un décollement de l'interface (observé dans le cas du BFUP grâce à des observations sur des champs de 1 cm) ;
 - le décollement de l'interface a pu être observé dans les assemblages épicea cernes convexes-BFUP et douglas cernes inclinés-BFUP par l'analyse de champs de 1 cm au niveau de l'interface. Les cartes de déformations montrent un décollement localisé dans le bois, ce qui indique un décollement adhésif bois-colle ;
 - en collant le bois dans le sens concave des cernes nous n'observons pas de rupture de l'assemblage sur les cartes de déformations, même dans l'observation à l'échelle de l'interface (avec un champ de 1 cm). Cette situation apparaît plus favorable que les autres du point de vue de la tenue de l'assemblage sous sollicitation hydrique.

En conclusion, les déformations du bois induites par les chargements hydriques ont un effet sur la tenue de l'assemblage. Il est possible de limiter les dommages en faisant varier la géométrie du bois. Par exemple, la fissuration du béton peut être évitée en orientant les cernes du bois dans le sens « concave » ou « incliné ». Aussi coller le bois dans le sens « concave » peut réduire le risque de décollement de l'interface.

- (3) Sur les tests de chargement sous 97 % d'humidité relative de la série 4 :
- nous n'observons pas de rupture d'interface ou de BFUP dans les deux dernières configurations étudiées dans ce chapitre, c'est-à-dire le cas d'un assemblage avec des rainures dans le bois et le cas avec le douglas contenant toutes les lamelles du lamellé-collé. Les déformations ε_{xx} et ε_{yy} proches de l'interface sont importantes mais n'induisent pas dans ces situations une fissuration du BFUP ou un décollement de l'interface ;
 - dans le cas douglas toutes lamelles-BFUP, l'eau diffuse sur une profondeur d'environ 3 cm dans le bois au bout d'un mois de chargement hydrique. Sur une structure de taille réelle soumise à des variations climatiques, on peut penser que les déformations du bois ne vont avoir un effet qu'aux bords de l'interface.

Les essais réalisés sous imbibition ou sous humidité relative élevée montrent que la configuration cernes sens « convexe » est défavorable et conduit à deux types d'endommagement (fissuration du béton et

décollement de l'interface bois-colle). La procédure « imbibition » est plus sévère mais peut être considérée comme un test de validation de la durabilité de l'assemblage. Les essais sous humidité relative élevée nécessitent de réaliser des observations à des échelles plus fines (champs de 1 cm) pour évaluer plus précisément le décollement de l'interface. Ces résultats montrent aussi que le BFUP permet de réduire les risques de fissuration.

L'étape suivante de nos travaux consiste à développer un modèle numérique par éléments finis pour simuler le comportement hydromécanique de l'assemblage bois-béton collé. Les cartes de déformations obtenues expérimentalement par la technique de corrélation d'images sont utilisées pour valider la pertinence du modèle numérique par comparaison des résultats numériques et expérimentaux. Une fois le modèle validé, il est possible d'évaluer et de quantifier les contraintes induites par les chargements hydriques au niveau de l'interface dans les différentes configurations étudiées dans ce chapitre.

Par ailleurs, du fait des hétérogénéités du bois, du protocole expérimental (incertitudes de mesures, effet de la peinture etc.), les résultats expérimentaux peuvent être sujets à discussion. Dans ce sens, même si l'ensemble de nos résultats a permis d'identifier de manière cohérente les mécanismes d'endommagement au niveau de la connexion en lien avec les orientations des cernes, la modélisation numérique permettra de discuter plus précisément les mécanismes d'endommagement observés.

Le but de cette démarche est d'optimiser la connexion par collage et de définir des conditions de mise en œuvre et d'utilisation de ces assemblages en conditions de service.

5 Modélisation numérique du comportement hydromécanique de l'assemblage bois-béton

L'objectif du chapitre 5 est de modéliser sur Abaqus le comportement hydromécanique de l'assemblage bois-béton collé et de valider le modèle considéré en comparant les résultats numériques aux cartes de déformations obtenues par corrélation d'images (DIC).

Nous avons montré dans le chapitre 4, via l'analyse par DIC, que l'endommagement d'assemblages collés bois-béton soumis à des variations hydriques peut s'expliquer par le caractère hygroscopique du bois. Nous présentons dans une première partie de ce chapitre le modèle hydromécanique développé.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la validation du modèle par une étude comparative avec les résultats obtenus par DIC présentés au chapitre 4. Les cartes numériques de déformation seront dans un premier temps comparées aux cartes expérimentales obtenues. Les mécanismes d'endommagement qui ont été mis en évidence expérimentalement (fissuration du béton et décollement de l'interface) seront discutés dans un second temps par rapport aux contraintes générées au niveau de l'interface. Les résultats du modèle seront en particulier discutés au regard des résultats expérimentaux (incertitudes, biais des conditions expérimentales).

Enfin, la troisième partie présente l'analyse à l'échelle 1 du comportement d'une structure mixte bois-béton collée soumise à des variations hydriques.

L'ensemble de ces travaux conduit à définir les conditions optimales de mise en œuvre et d'utilisation de ces assemblages, qui permettent d'assurer leur tenue sous humidité relative variable.

5.1 Modélisation hydromécanique

Nous avons discuté des effets des transferts hydriques dans le bois dans le chapitre 2. Nous allons dans cette partie développer cet aspect afin de justifier l'utilisation du modèle de calcul permettant d'estimer les variations d'humidité interne et donc les déformations locales dans le bois induites par des variations d'humidité relative. Le modèle proposé sera par ailleurs appliqué aux autres matériaux pour lesquels les mêmes lois peuvent être considérées.

Le calcul par éléments finis est réalisé avec le logiciel Abaqus. À chaque échéance, la teneur en eau est actualisée selon la loi de diffusion considérée (§5.1.1), puis les déformations/contraintes induites sont calculées (§5.1.2). Dans le cas présent, le modèle considéré est non couplé (pas de dépendance des phénomènes de diffusion aux contraintes mécaniques induites).

5.1.1 Diffusion hygroscopique dans le bois

Dans la bibliographie, on retrouve différentes approches, toutes basées sur les lois de diffusion de Fick. Pour décrire les transferts hydriques dans le bois, nous avons considéré la diffusion dans le domaine hygroscopique, dans lequel les diffusions de la vapeur d'eau et de l'eau liée ainsi que le couplage entre les deux phases sont à prendre en compte. De manière générale, le processus de diffusion sera déterminé considérant le flux d'humidité (1^{re} loi de Fick) et la conservation de la masse (2^e loi de Fick). Comme explicité dans le chapitre 1, le choix de la force responsable du mouvement de l'eau diffère d'un auteur à l'autre (la concentration d'humidité, la teneur en eau dans le bois, la pression de vapeur d'eau ou l'humidité relative de l'air).

Plus précisément, l'approche présentée dans ce travail repose notamment sur les travaux de Zillig (Zillig, 2009) dans lesquels le problème est simplifié car il considère un seul champ (coefficient de diffusion unique pour les deux phases) et pour lequel la variable prise en compte dans la première loi de Fick est la pression de vapeur. À noter que par cette simplification, le même modèle de diffusion pourra être appliqué au béton et à la colle.

Équation de diffusion hygroscopique

Le processus de diffusion tridimensionnelle, selon les directions d'anisotropie du bois, de l'humidité conduit à définir le flux d'humidité J ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) suivant :

$$5-1 \quad \mathbf{J} = -\mathbf{D}\nabla p_v$$

Avec \mathbf{D} , le tenseur de diffusion dans le repère local R, T, L (s) et p_v , la pression de vapeur d'eau (N.m^{-2}) qui vérifie la relation suivante en fonction de l'humidité relative H_R :

$$5-2 \quad p_v(H_R) = p_{\text{sat}} \cdot H_R$$

Avec p_{sat} la pression de saturation, constante, à température constante (N.m^{-2}).

Considérant la conservation de la masse, la masse d'eau w (kg/m^3) dans l'échantillon est définie par :

$$5-3 \quad \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div} [\mathbf{J}] = 0$$

Ainsi, le modèle de diffusion hygroscopique est exprimé par l'équation suivante :

$$5-4 \quad \frac{\partial w}{\partial t} - \text{div}(\mathbf{D}(H_R) \nabla p_v) = 0$$

Par définition, la masse de vapeur d'eau étant négligée, la masse d'eau liée dans le bois w s'exprime par :

$$5-5 \quad w = \rho_0 h(H_R)$$

Où ρ_0 est la masse volumique du bois sec (kg/m^3),

$h(H_R)$ est la teneur en eau dans le bois (-).

L'équation 5.4 devient :

$$5-6 \quad \rho_0 \frac{\partial h(H_R)}{\partial t} - p_{\text{sat}} \text{div}[\mathbf{D}(H_R) \nabla H_R] = 0$$

Pour simplifier l'équation 5-6 on pose les hypothèses suivantes :

- (1) les coefficients du tenseur de diffusion \mathbf{D} restent constants dans un domaine d'humidité relative considéré, soit dans les domaines suivants : [55 % ; 81 %] et [81 % ; 97 %] définis dans le chapitre 2 ;
- (2) la teneur en eau est une fonction linéaire par morceaux de l'humidité relative dans les domaines H_R considérés précédemment. Nous avons établi au chapitre 2 les courbes de sorption des bois d'épicéa et de douglas. a_i sont les coefficients directeurs reliant la teneur en eau h dans le bois à l'humidité relative H_R de l'air représenté par les courbes de sorption.

Utiliser la teneur en eau dans le bois ou l'humidité relative comme élément moteur dans l'équation de diffusion n'a pas d'incidence sur le calcul étant donné la relation linéaire qui lie les deux paramètres dans chaque domaine d'humidité considéré (55 % ; 81 % ou 81 % ; 97 %). Nous avons choisi dans nos travaux de travailler en fonction de l'humidité relative pour des raisons de commodité. Cela permet de pouvoir définir les conditions aux limites et initiales en H_R (la pression de vapeur sur les bords libres est égale à la pression atmosphérique ; le coefficient d'échange étant considéré comme infini). Il suffira de convertir les paramètres dépendants de la teneur en eau du bois (les coefficients de dilatations hydriques et les modules élastiques) et de les exprimer en fonction de l'humidité relative pour les intégrer dans les calculs.

L'équation de diffusion 5-6 devient donc une équation simple équivalente à la deuxième loi de Fick sur chaque domaine d'humidité relative considéré :

5-7

$$\frac{\partial H_R}{\partial t} - \frac{p_{sat} D}{\rho_0 a_i} \Delta H_R = 0$$

Application au calcul numérique

Sur Abaqus, nous utilisons le modèle thermique qui repose sur la loi de Fourier dont les équations sont analogues aux transferts hydriques dans le bois exprimé par :

5-8

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \Delta T = 0$$

Avec c est la chaleur spécifique massique du matériau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$),

T représente la température (K),

λ est la conductivité thermique ($J.m^{-1}.K^{-1}.s^{-1}$),

et ρ est la masse volumique du matériau ($kg.m^{-3}$).

Par analogie, les identifications suivantes seront considérées : $\rho = 1$, $C = 1$ et $\lambda = \frac{p_{sat} D_c}{\rho_0 a}$

5.1.2 Comportement mécanique

Dans le cas présent, du fait des hypothèses de chargement (humidification sans cycles) et la durée des essais, les effets différés (fluage) et les couplages hygromécaniques ne sont pas considérés (mécanosorption, etc..). Le tenseur (total) de déformation ϵ peut alors être additivement décomposé en deux parties comme suit :

5-9

$$\epsilon^{tot} = \epsilon^{el} + \epsilon^{hy}$$

À noter que cette simplification, ne considérant que la déformation élastique et hydrique, va dans le sens de la sécurité lorsqu'il s'agit d'estimer les contraintes induites par le phénomène de retrait-gonflement empêché. Pour rappel, comme exprimé dans le chapitre 2, le comportement élastique du bois est localement orthotrope. De fait, la composante élastique de la déformation est donnée par :

5-10

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L^{el} \\ \varepsilon_R^{el} \\ \varepsilon_T^{el} \\ \gamma_{RT}^{el} \\ \gamma_{LT}^{el} \\ \gamma_{LR}^{el} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{pmatrix}$$

La dépendance à l'humidité des modules sera prise en compte, supposant les relations établies par (Guitard, 1985) (chapitre 1, équation 1-9).

Par ailleurs, nous avons déterminé au chapitre 2 les valeurs des coefficients de dilatation hydrique dans les directions radiale, tangentielle et longitudinale des bois d'épicéa et de douglas à 20°C que nous avons exprimées en %/% de teneur en eau, et nous avons montré leur relation linéaire avec la teneur en eau dans le bois entre 0 % et la teneur en eau au point de saturation des fibres PFS.

La déformation hydrique est déterminée par l'expression suivante donnée au paragraphe 1.2.1 du chapitre 1 :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_r^{hy} \\ \varepsilon_t^{hy} \\ \varepsilon_l^{hy} \end{pmatrix} = (h - h_{ref}) \begin{pmatrix} \alpha_R & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L \end{pmatrix}$$

Avec ε_r^{hy} , ε_t^{hy} et ε_l^{hy} les déformations hydriques calculées respectivement dans les directions radiale, tangentielle et longitudinale,

α_R , α_T et α_L les coefficients de dilatation hydrique du bois exprimés en %/% de teneur en eau.

h_{ref} représente la teneur en eau de référence pour laquelle on considère que $\varepsilon^{hy}(h_{ref}) = 0$

La déformation hydrique en fonction de l'humidité relative s'exprime par :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_r^{hy} \\ \varepsilon_t^{hy} \\ \varepsilon_l^{hy} \end{pmatrix} = (H_R - H_R^{ref}) \begin{pmatrix} \alpha_R(H_R) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T(H_R) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L(H_R) \end{pmatrix}$$

Où $\alpha_R(H_R)$, $\alpha_T(H_R)$ et $\alpha_L(H_R)$ sont définis dans les domaines de H_R : [0 ; 32], [32 ; 55], [55 ; 81] et [81 ; 97] à l'aide des courbes de sorption, et exprimés en %/% de H_R .

Et H_R^{ref} l'humidité relative de référence pour laquelle $\varepsilon^{hy}(H_R^{ref}) = 0$

5.2 Hypothèses du calcul numérique

5.2.1 Géométries et maillage

Les comportements des deux bois, épicéa et douglas, ont été modélisés. On rappelle qu'initialement les échantillons sont à l'équilibre à $H_R=55\%$. La figure 5-1 représente les conditions aux limites et de chargements imposées dans les calculs. L'échantillon est soumis à $t=0$ à $H_R=97\%$ (la diffusion suivant la direction perpendiculaire au plan XY est empêchée).

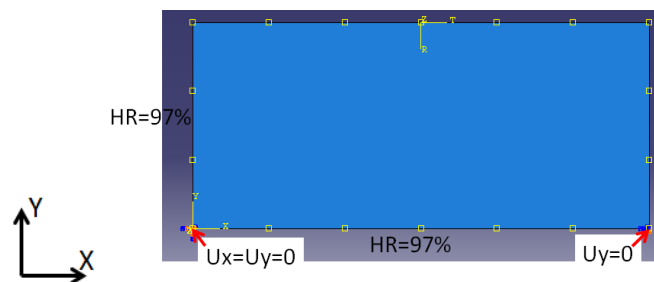


Figure 5-1 : Conditions aux limites et de chargements hydriques imposées.

Dans les calculs, on suppose que le bois se comporte comme un matériau homogène élastique orthotrope. On précisera donc pour chaque situation le centre d'orthotropie du bois. Dans le cas des assemblages collés, les interfaces bois-colle et colle-béton sont supposées parfaites (pas d'ouverture et de glissement) et le comportement des matériaux béton et colle élastique et isotrope. Les modèles présentés pour le bois (§5.1) seront considérés pour la colle et le béton (cas isotrope sans dépendance à l'humidité pour leurs caractéristiques).

Le maillage est défini par des éléments standards linéaires quadrangles. La taille des éléments choisis est considérée comme suffisante par rapport aux objectifs de ce travail (validation du modèle par les cartes de déformations obtenues par corrélation d'images, ordre de grandeur des déformations) (Figure 5-2). À noter qu'il n'y a pas eu d'études sur l'effet de la finesse du maillage. Dans ce sens, les résultats au niveau des bords libres seront à considérer qualitativement et avec prudence (valeurs aux bords reproduisant non finement les effets de bords). Par ailleurs, du fait des incertitudes de mesures sur les valeurs de déformation par corrélation d'images, la comparaison entre données expérimentales et numériques peut être biaisée lorsque le niveau des déformations est de l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure.

Les calculs ont été réalisés en conditions de déformations planes pour se rapprocher des conditions expérimentales.

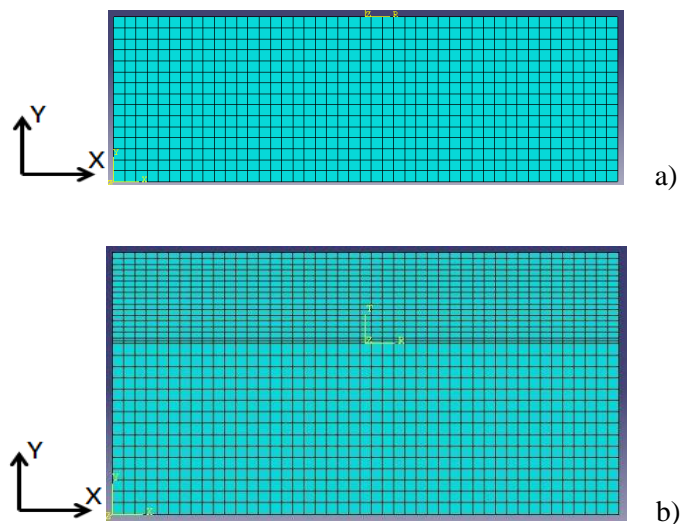


Figure 5-2 : Géométrie et maillage. a) bois seul, b) assemblage bois-béton.

5.2.2 Propriétés des matériaux

Dans ce paragraphe, nous récapitulons les données matériaux considérées dans les calculs.

5.2.2.1 Valeurs numériques pour les bois d'épicéa et de douglas

- (1) La « chaleur spécifique C » et la masse volumique ρ définies dans l'équation de diffusion sont prises égales à 1 (voir équation 5-8)
- (2) Les modules d'élasticité du douglas et de l'épicéa sont donnés dans les tableaux 5-1 et 5-2. Nous avons repris les relations 2-1 du chapitre 2, établies par (Guitard, 1985) pour les modules d'Young E et de cisaillement G , permettant de prendre en compte leur dépendance avec la teneur en eau entre $h=6\%$ et $h=20\%$. Les données à $h=12\%$ sont données dans le tableau 2-2, chapitre 2. Nous avons considéré qu'en dehors de cette plage de teneur en eau, c'est-à-dire en-dessous de 6% et au-dessus de 20% , les modules sont constants et respectivement égaux à celui calculé à $h=6\%$ et à $h=20\%$.

Tableau 5-1 : Modules d'élasticité de l'épicéa en fonction de H_R .

H_R (%)	h (%)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	E_L (MPa)	G_{RL} (MPa)	G_{TL} (MPa)	G_{RT} (MPa)
0	0	910,9	501,5	10191,0	747,6	712,6	35,1
32	6	910,9	501,5	10791,0	747,6	712,6	35,1
55	10,5	805,8	443,6	10116,9	661,4	630,4	31,0
65	12	772,0	425,0	9900,0	633,6	603,9	29,7
81	15,7	687,2	378,3	9356,6	564,0	537,6	26,4
90	20	586,7	323,0	8712,0	481,5	458,9	22,6
> 97	>25,6	586,7	323,0	8712,0	481,5	458,9	22,6

Tableau 5-2 : Modules d'élasticité du douglas en fonction de H_R .

H_R (%)	h (%)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	E_L (MPa)	G_{RL} (MPa)	G_{TL} (MPa)	G_{RT} (MPa)
0	0	1011,0	743,4	14868,0	951,5	1159,7	104,1
32	4,1	1011,0	743,4	14868,0	951,5	1159,7	104,1
43	6	1011,0	743,4	14868,0	951,5	1159,7	104,1
55	8	959,6	705,6	14111,7	903,1	1100,7	98,8
73	12	856,8	630,0	12600,0	806,4	982,8	88,2
81	13,6	816,5	600,4	12007,3	768,5	936,6	84,0
93	20	651,2	478,8	9576,0	612,9	746,9	67,0
> 97	>22,3	651,2	478,8	9576,0	612,9	746,9	67,0

- (3) Les coefficients de poisson sont considérés constants (Tableau 5-3) pour une valeur établie à $h=12$ % (Tableau 2-2, chapitre 2). Un calcul complémentaire a montré que cette hypothèse va dans le sens de la sécurité pour la détermination des contraintes induites au niveau de l'interface.

Tableau 5-3 : Coefficients de poisson de l'épicéa et du douglas.

	μ_{RL}	μ_{RL}	μ_{RL}
Épicéa	0,04	0,025	0,435
Douglas	0,036	0,029	0,390

- (4) On rappelle les valeurs de $(\frac{p_{sat} \cdot D}{\rho_0 a})$ établies au chapitre 2 dans le tableau 5-4 exprimées dans les calculs en $mm^2 \cdot s^{-1}$.

Tableau 5-4 : Valeurs de $(\frac{p_{sat} \cdot D}{\rho_0 a})$ intégrées dans le calcul pour l'épicéa et le douglas dans les directions R, T et L.

	H_R (%)	$\frac{p_{sat} D_R}{\rho_0 a}$ ($mm^2 \cdot s^{-1}$)	$\frac{p_{sat} D_T}{\rho_0 a}$ ($mm^2 \cdot s^{-1}$)	$\frac{p_{sat} D_L}{\rho_0 a}$ ($mm^2 \cdot s^{-1}$)
Épicéa	55-81	3,5E-6	3,5E-6	3,5E-5
	81-97	1,7E-5	1,7E-5	6,9E-5
Douglas	55-81	1,2E-5	9,3E-6	3,7E-5
	81-97	1,7E-5	2,1E-5	6,9E-5

- (5) Les coefficients de dilatation hydrique sont exprimés dans le tableau 5-5 en fonction de l'humidité relative (en %/% de H_R) et ont été mesurés à l'aide des courbes de sorption (Figures 2-4 et 2-5 du chapitre 2).

Tableau 5-5 : Valeurs des coefficients de dilatations hydriques des bois d'épicéa et de douglas en fonction de H_R

	H_R (%)	α_R (%/‰ de H_R)	α_T (%/‰ de H_R)	α_L (%/‰ de H_R)
Épicéa	0-32	2,50E-4	4,93E-4	1E-6
	32-55	2,46E-4	5,68E-4	2,20E-6
	55-81	2,33E-4	5,87E-4	5,54E-6
	81-97	3,55E-4	8,44E-4	1,68E-5
Douglas	0-32	1,41E-4	2,65E-4	4,54E-5
	32-55	1,83E-4	3,01E-4	9,30E-5
	55-81	1,99E-4	3,35E-4	1,13E-4
	81-97	2,68 E-4	5,10E-4	1,26E-4

5.2.2.2 Valeurs numériques pour le béton et l'adhésif époxy

Les valeurs des coefficients de diffusion et de dilatation hydrique du béton ont été appréciées à partir de données de la littérature (AFGC, 2004). Par défaut, les données sur la colle sont identiques à celles du béton (Tableau 5-6).

Tableau 5-6 : Données béton et résine époxy.

	Béton	Époxy
E (MPa)	40000	7800
μ	0,2	0,2
Coefficient de diffusion hydrique $D = \lambda/\rho C D = \lambda/\rho C$ ($\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$)	1E-8	1E-8
Coefficient de dilatation hydrique (%/‰H_R)	1E-6	1E-6

5.3 Validation du modèle

Les calculs dans le but de valider les modèles ont été effectués en 2D (hypothèse de déformation plane) et comparés aux résultats obtenus par corrélation d'images numériques présentées au chapitre 4.

Dans ce qui suit, les cartes de déformations numériques et expérimentales sont présentées de sorte que les mêmes couleurs expriment des valeurs similaires de déformation. Nous pouvons donc à la fois observer la carte générale des déformations et comparer les valeurs de simulation avec les mesures expérimentales.

5.3.1 Corps d'épreuve en bois en cours d'humidification

5.3.1.1 Cas de l'épicéa

L'échantillon étudié (dimensions, sens du bois, maillage) est décrit par la figure 5-3. Pour se rapprocher le plus possible de l'échantillon d'épicéa utilisé lors de l'essai de corrélation d'images, on suppose que le centre d'orthotropie est situé 3 cm au-dessus de l'échantillon.

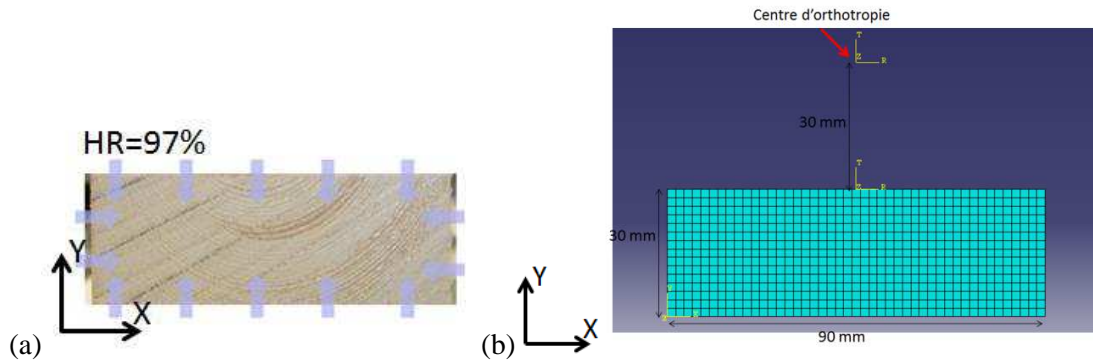


Figure 5-3 : (a) Photo de l'échantillon d'épicéa utilisé pour les essais, (b) géométrie et maillage.

Les cartes de déformations ε_{xx} et ε_{yy} obtenues sur Abaqus, à différentes échéances (1, 2, 5 et 14 jours), sont comparées aux cartes de déformations obtenues par corrélation d'images. Les résultats présentés par la figure 5-4 montrent que :

- les cartes de déformations ε_{xx} numériques et expérimentales sont très proches au début de l'essai, c'est-à-dire à 1, 2 et 5 jours, avec très peu de déformations visibles aux échéances 1 et 2 jours ;
- à 5 jours, des zones de déformations quasi nulles voire négatives localisées sur la face supérieure sont observables sur les deux cartes de déformations ε_{xx} expérimentale et numérique. On mesure expérimentalement et numériquement des déformations ε_{xx} très proches de l'ordre de 0,5 à 0,7 % en zone centrale (en bleu) ;
- à 14 jours, on retrouve des déformations ε_{xx} plus importantes expérimentalement que dans le calcul :
 - les déformations ε_{xx} en zone centrale (en jaune) sont de l'ordre de 1,3 % expérimentalement contre environ 1 % dans les calculs,
 - au niveau de la face supérieure, on observe numériquement deux zones de déformations négatives très proches de 0 (de l'ordre de -0,02 % en violet), sur la carte de déformations ε_{xx} expérimentale, la déformation est de 0,6 % au niveau de ces deux mêmes zones (en bleu clair).

Dans l'expérience, du joint silicone est utilisé pour limiter la diffusion de l'eau le long des fibres du bois sur la face observée et celle opposée. Or, la silicone ne permet pas de bloquer totalement la diffusion de l'eau dans la direction Z car à l'état gazeux, elle peut pénétrer au niveau des

interfaces bois-joint et verre-joint⁸. Ainsi, le processus de diffusion de l'eau dans le bois est modifié au niveau de la face d'observation. Ceci n'est pas pris en compte dans le calcul en 2D et permet d'expliquer en partie cette différence entre le résultat expérimental et le calcul observée à 14 jours.

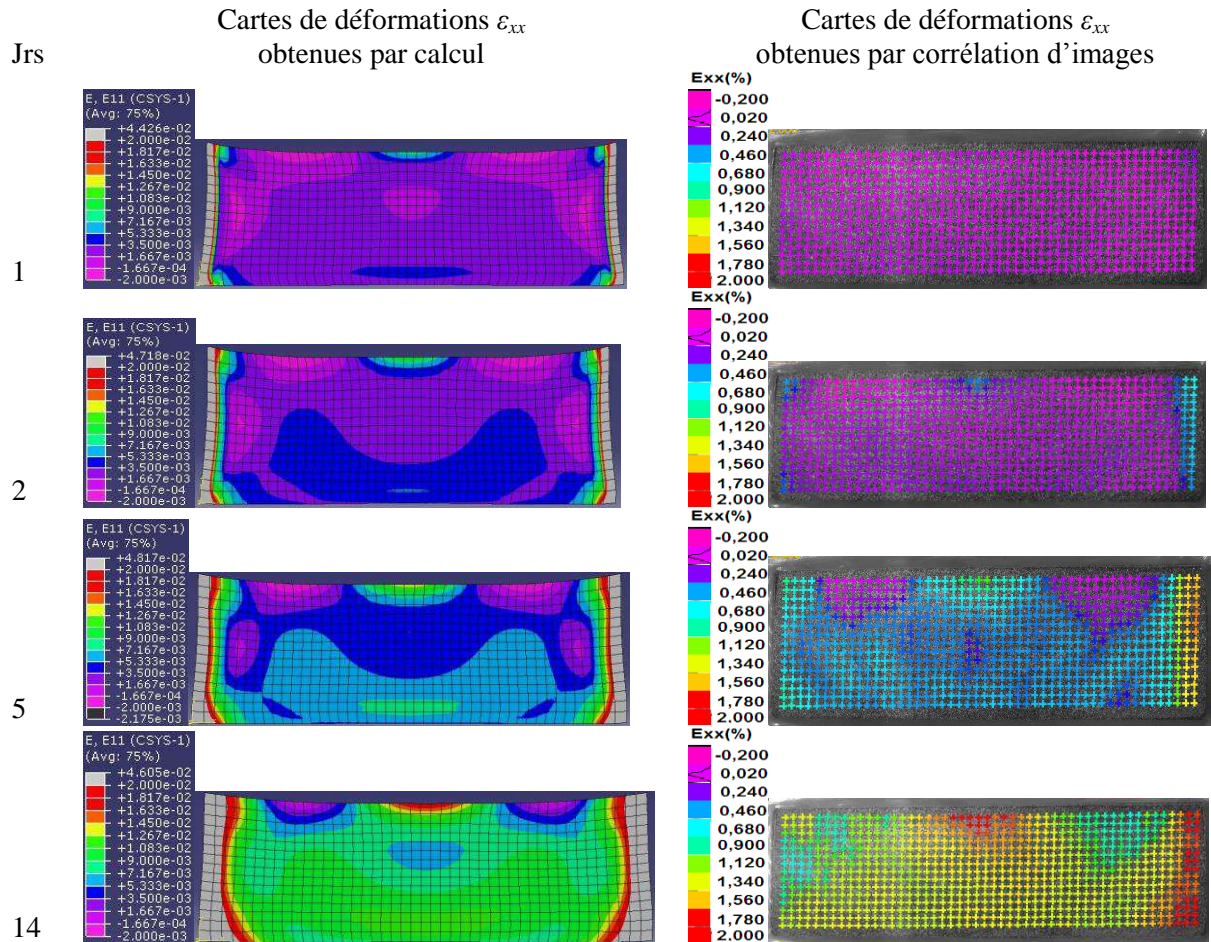


Figure 5-4 : Comparaison des cartes de déformations ε_{xx} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours de l'épicea.

Les cartes de déformations ε_{yy} présentées dans la figure 5-5 montrent que :

- les cartes de déformations ε_{yy} numériques et expérimentales sont très proches à 1 et 2 jours, avec très peu de déformations visibles ;
- à 5 jours, les déformations numériques et expérimentales sont très proches avec une zone centrale (en violet) dont les déformations sont de l'ordre de -0,2 %. L'aspect global de la carte est cependant un peu différent au niveau du bord supérieur. Les simulations montrent des déformations supérieures à 2 % (allant jusqu'à 5 %) sur tout le bord, tandis qu'on observe par la

⁸ À noter que des essais réalisés sur des cubes de bois protégés avec de la silicone avaient montré que la teneur en eau augmentait lorsqu'ils étaient soumis à une humidification. Ce résultat confirme cette hypothèse.

corrélation d'images deux zones de déformations supérieures à 2 % et une zone centrale avec des déformations de l'ordre de 0,6 % ;

- à 14 jours, on observe le même phénomène que sur les cartes de déformations ε_{xx} , avec des déformations plus importantes expérimentalement que dans les simulations, notamment au cœur de l'échantillon (avec $\varepsilon_{yy} > 0,6\%$ expérimentalement contre $-0,2\%$ dans les simulations). On explique cette différence par l'étanchéité imparfaite du joint.

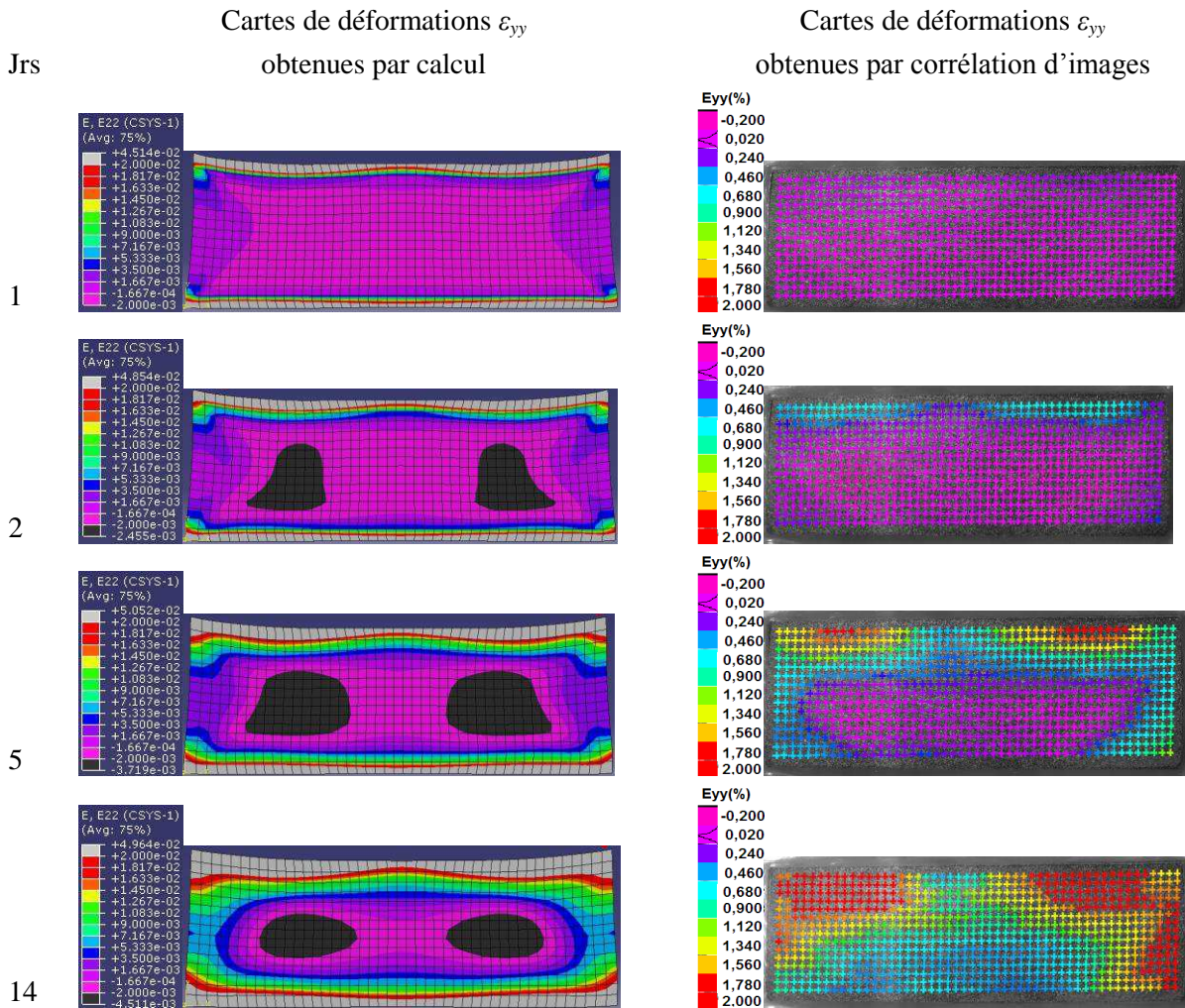


Figure 5-5 : Comparaison des cartes de déformations ε_{yy} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours de l'épicéa.

La figure 5-6 montre les cartes de déformations numériques ε_{xx} et ε_{yy} lorsque le bois a atteint l'équilibre hygroscopique (à 219 jours pour le cas de l'épicéa). Ces cartes montrent bien des déformations positives dans tout le bois comme on peut l'observer expérimentalement à 14 jours.

On retiendra que les déformations numériques (ne sortant pas de l'intervalle $[-0,5\% ; 5\%]$) et expérimentales sont du même ordre de grandeur.

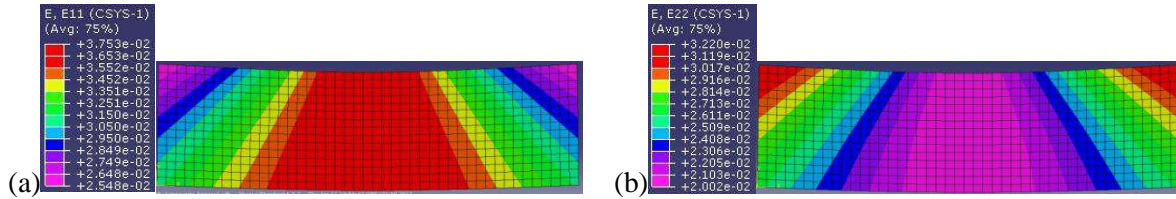


Figure 5-6 : (a) Carte de déformations ϵ_{xx} , (b) carte de déformations ϵ_{yy} de l'épicéa après 219 jours de chargement hydrique (état d'équilibre).

5.3.1.2 Cas du douglas

L'emplacement du centre d'orthotropie est précisé sur la figure 5-7b. Il a été choisi de façon à obtenir par le calcul des cartes de déformations proches de celles obtenues par corrélation d'images.

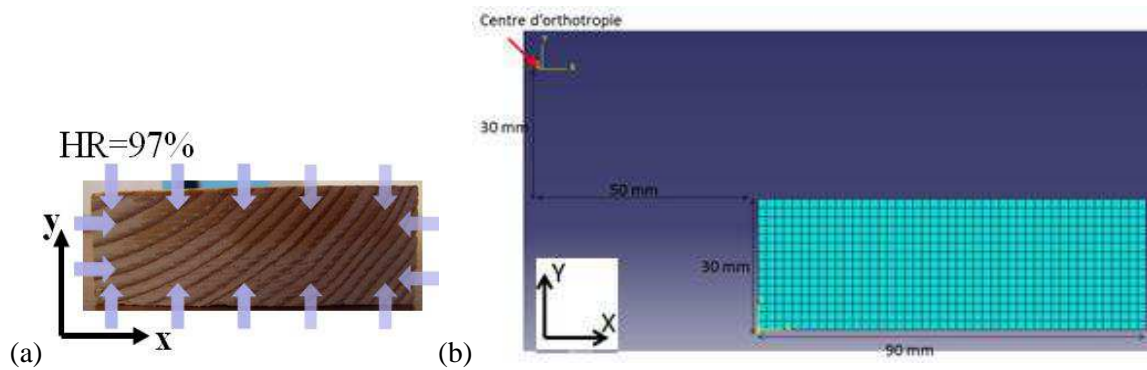


Figure 5-7 : (a) Photo de l'échantillon de douglas utilisé pour les essais, (b) géométrie.

Comme pour le cas de l'épicéa, les cartes de déformations ϵ_{xx} et ϵ_{yy} obtenues sur Abaqus sont comparées aux cartes de déformations obtenues par corrélation d'images aux échéances 1, 2, 5 et 14 jours (Figures 5-8 et 5-9).

Sur les cartes de déformations ϵ_{xx} (Figure 5-8) on observe que :

- les cartes de déformations ϵ_{xx} numériques et expérimentales sont très proches à 1 et 2 jours avec très peu de déformations visibles ;
- à 5 jours, le calcul numérique prévoit en zone centrale des déformations de l'ordre de 0,3 à 0,5 % (en bleu foncé) très proches de celles observées expérimentalement (en bleu clair, $\epsilon_{xx}=0,4$ à 0,6 %), l'aspect global des deux cartes est très proche ;
- à 14 jours, les déformations ϵ_{xx} mesurées par DIC en zone centrale (en jaune et vert) de l'ordre 0,9 à 1,1 % sont légèrement supérieures aux résultats numériques avec environ 0,7 à 0,9 % (en bleu clair et vert). Le même phénomène lié à l'étanchéité du joint de silicone imparfaite est observé. La différence observée ici est la même que dans le cas du bois d'épicéa.

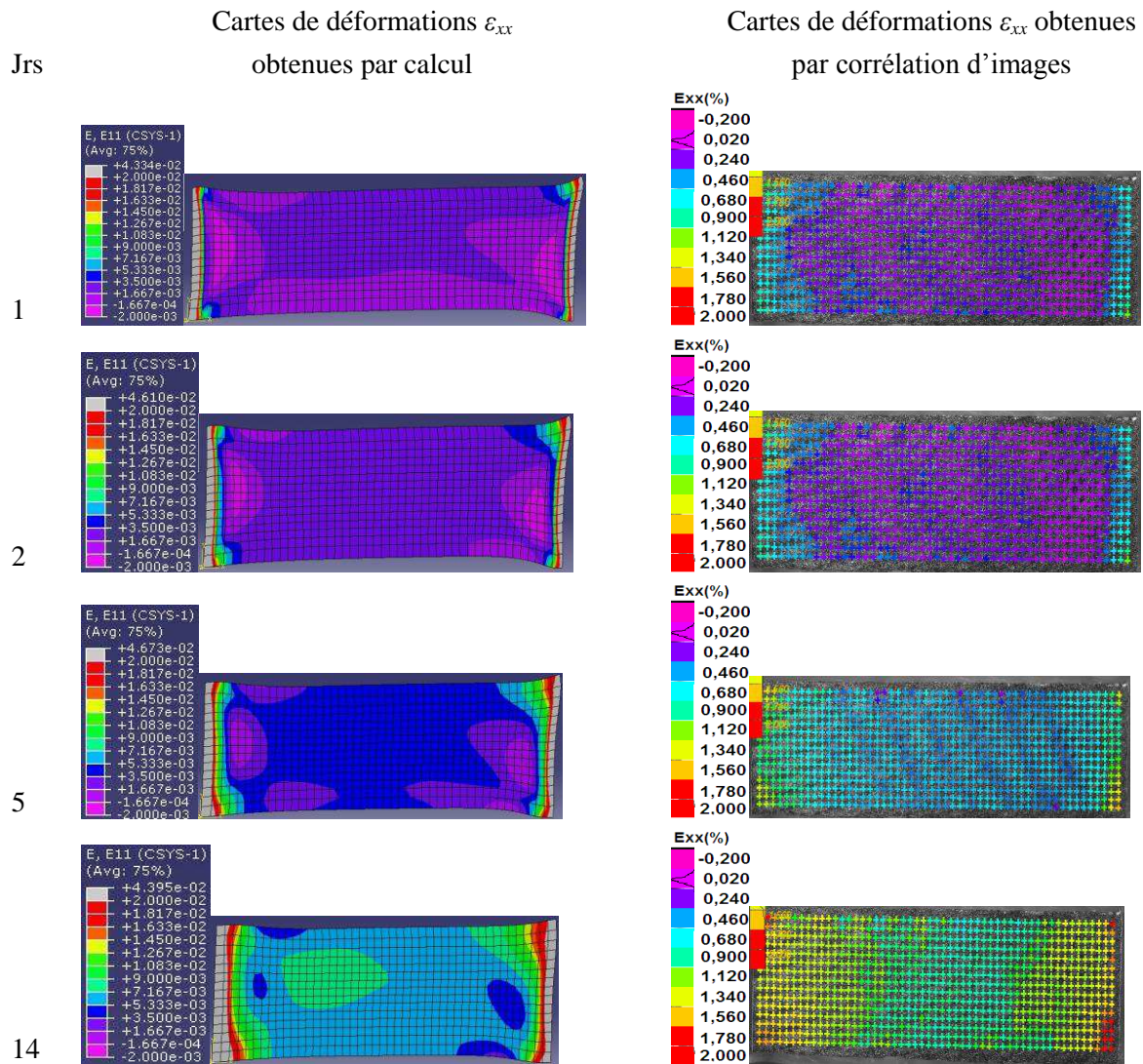


Figure 5-8 : Comparaison des cartes de déformations ε_{xx} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours du douglas.

Les cartes de déformations ε_{yy} sont présentées dans la figure 5-9. On observe que :

- les cartes de déformations ε_{yy} numériques et expérimentales sont très proches à 1 et 2 jours, avec très peu de déformations visibles ;
- à 5 jours, les déformations numériques et expérimentales sont très proches avec une zone centrale (en violet) dont les déformations sont de l'ordre de -0,2 % à 0 %. En revanche on observe au niveau des bords supérieur et inférieur des déformations supérieures à 2 % dans les calculs, et de l'ordre de 1 % dans l'expérience ;
- à 14 jours, la même remarque peut être faite que pour la carte de déformations ε_{xx} ainsi que pour le cas du bois d'épicéa. Les résultats expérimentaux présentent des déformations plus importantes que les résultats numériques, notamment au cœur de l'échantillon (avec $\varepsilon_{yy} > 0,6$ % en bleu clair et vert expérimentalement, contre -0,2 % en violet à 0,5 % en bleu dans les simulations). On explique cette différence aussi par l'étanchéité imparfaite du joint de silicone.

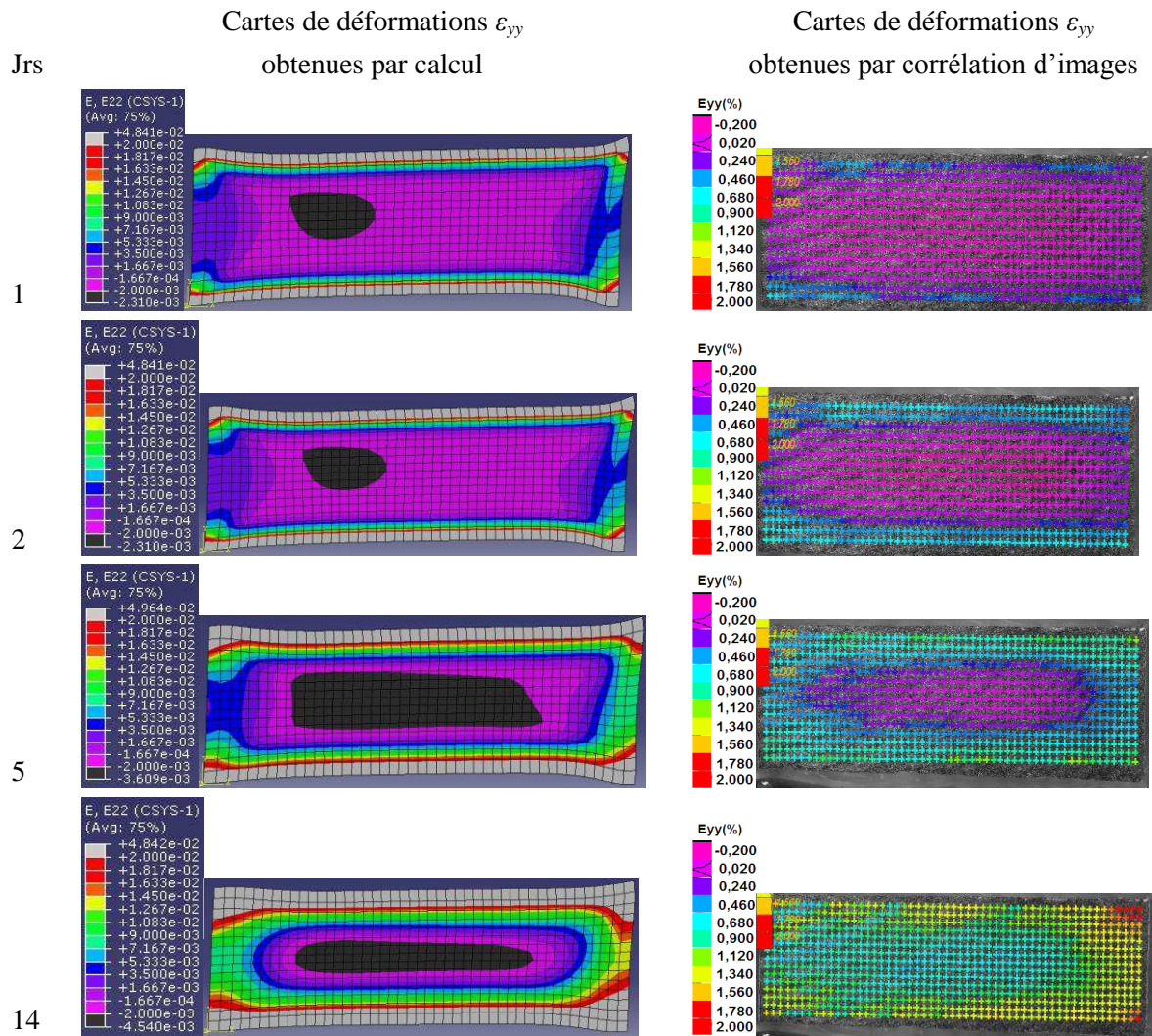


Figure 5-9 : Comparaison des cartes de déformations ε_{yy} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours du douglas.

La figure 5-10 montre les cartes de déformations numériques ε_{xx} et ε_{yy} lorsque le bois a atteint l'équilibre hygroscopique (à 300 jours pour le cas douglas). Ces cartes montrent bien des déformations positives dans tout le bois comme on peut l'observer expérimentalement à 14 jours.

On retiendra que comme dans le cas de l'épicéa, les déformations numériques ne sortent pas de l'intervalle $[-0,5 \% ; 5 \%$] pendant tout le calcul. Les déformations calculées sont toujours du même ordre de grandeur que les déformations mesurées.

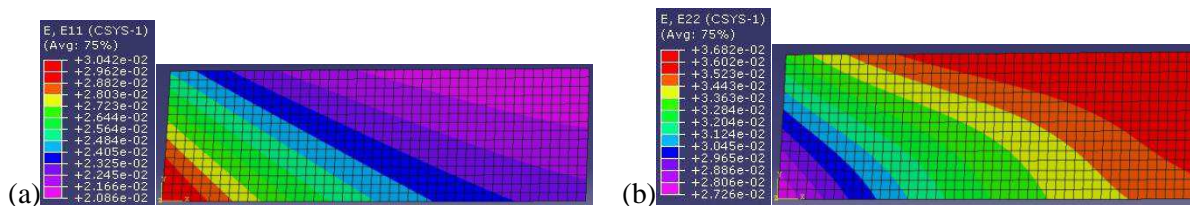


Figure 5-10 : (a) Carte de déformations ϵ_{xx} , (b) Carte de déformations ϵ_{yy} du douglas après 300 jours de chargement hydrique (état d'équilibre).

5.3.1.3 Conclusion

Les cartes de déformations numériques sont très similaires aux cartes de déformations expérimentales tant sur l'aspect général que sur les valeurs de déformations, et ceci pour les deux bois. Le léger écart observé à partir de 14 jours de chargement hydrique peut être dû à un défaut d'étanchéité des joints de silicone utilisés pour limiter la diffusion de l'eau dans la direction longitudinale. Les divergences observées peuvent aussi être expliquées par les hypothèses prises dans le calcul (valeurs considérées des propriétés mécaniques des bois, positionnement du centre d'orthotropie, non prise en compte de la variabilité des propriétés par rapport au centre d'orthotropie, ...).

L'ensemble des résultats numériques est cependant très satisfaisant pour la simulation du comportement hydrique du bois seul. Les hypothèses que nous avons posées ainsi que les données matériaux mesurées permettent d'obtenir des résultats cohérents qui correspondent très bien aux résultats expérimentaux. Nous pouvons donc valider le comportement hydrique du bois et le réutiliser pour le cas d'assemblages bois-béton.

5.3.2 Assemblages bois-béton en cours d'humidification

Dans le cas des assemblages bois-béton collés, nous avons repris pour géométries celles des échantillons testés dans la série 3 présentée au chapitre 4 (assemblages avec BFUP – test sous $H_R=97\%$). Nous avons dans un premier temps comparé les résultats numériques aux résultats expérimentaux comme dans le cas du bois seul afin de valider le comportement sous H_R de l'assemblage. Nous avons ensuite estimé les contraintes induites au niveau de l'interface par le gonflement du bois dans chacune des configurations étudiées afin de discuter les mécanismes d'endommagement mis en évidence dans le chapitre 4.

On remarquera que l'essai ne dure que 30 jours, et le comportement à long terme de la résine n'a donc pas été pris en compte dans le calcul. Or, nous avons vu dans le chapitre 1 que les résines s'assouplissent au cours du vieillissement. Ceci n'est pas dommageable pour la structure (tant que le module d'Young reste supérieur à 200 MPa (chapitre 3 – essais Push-Out)), mais peut modifier les contraintes induites par les déformations hydriques du bois au niveau de l'interface et tend à les diminuer. Les estimations de contraintes données dans ce paragraphe vont donc dans le sens de la sécurité dans notre cas.

On rappelle, dans la figure 5-11, les trois situations étudiées dans la série 3 en présentant notamment l'endroit où le centre d'orthotropie du bois est défini dans les calculs.

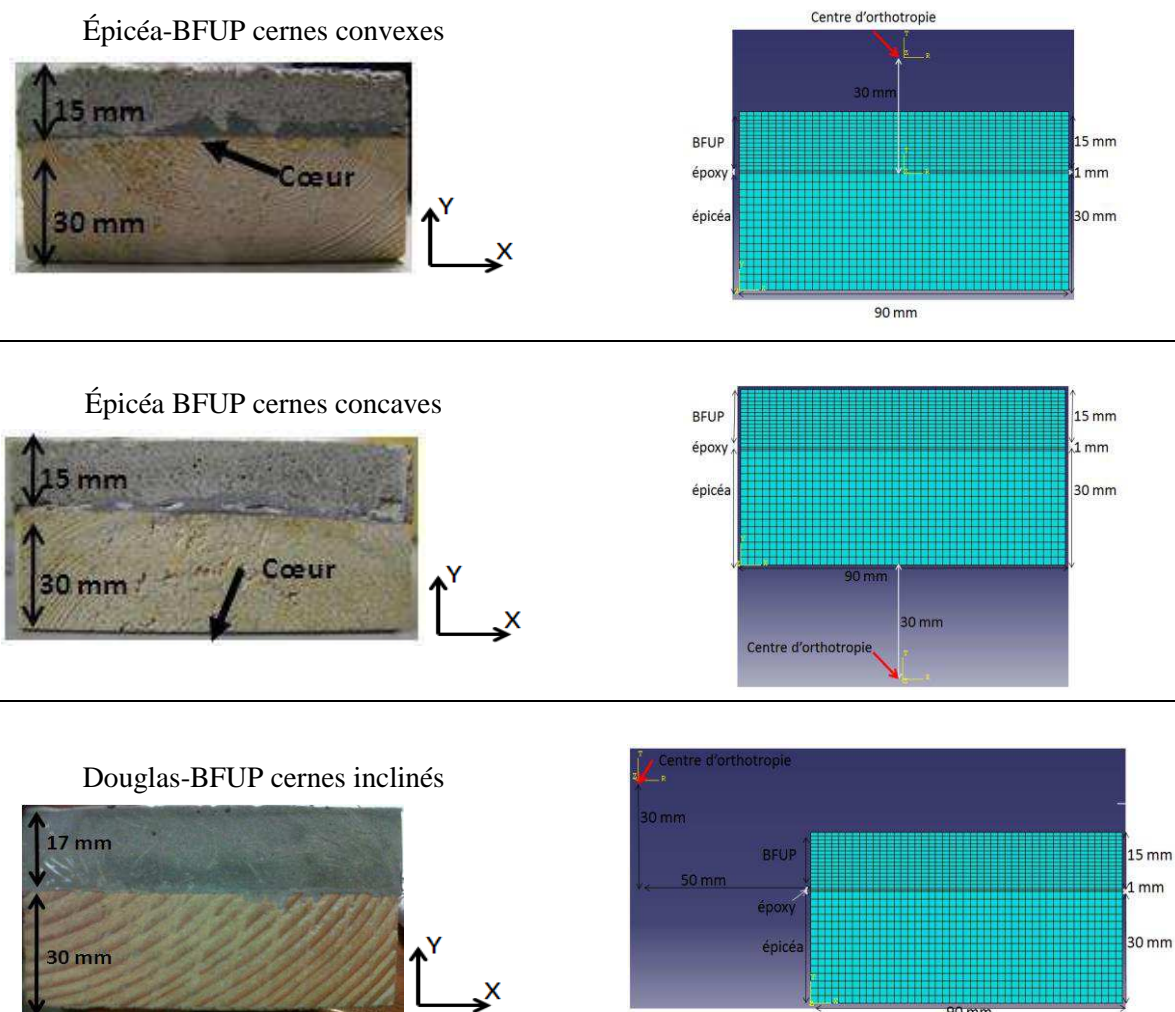


Figure 5-11 : Essais de la série 3 – géométries et maillages.

5.3.2.1 Champ de déformation

Nous présentons ici les résultats des simulations et les comparons aux résultats expérimentaux. Comme pour le cas du bois seul, les mêmes codes de couleur ont été considérés dans les cartes expérimentales et numériques pour faciliter la comparaison.

Dans la première configuration, *i.e.* le cas où l'épicéa est assemblé au BFUP dans le sens convexe des cernes, on présente les cartes de déformations ε_{xx} et ε_{yy} après 12 jours de chargement hydrique (Figure 5-12). On remarque que les allures globales des cartes de déformations ε_{xx} et ε_{yy} expérimentale et numérique sont très similaires :

- on retrouve les mêmes valeurs expérimentale et numérique de déformations ε_{xx} dans le bois proche de l'interface avec des déformations très faibles entre 0 et 0,1 % et dans le béton (sauf au niveau de la fissure observée durant l'essai). Sur les bords droit et gauche, elles sont importantes et supérieures à 1,6 % ;

- les cartes expérimentale et numérique de déformations ε_{yy} montrent deux zones de déformations négatives au niveau des bords droit et gauche du bois. Dans le bois proche de l'interface, les simulations prévoient cependant des déformations moins importantes que celles observées. Différence que nous pouvons attribuer à un défaut d'étanchéité de la face observée (cf. § 5.3.1).

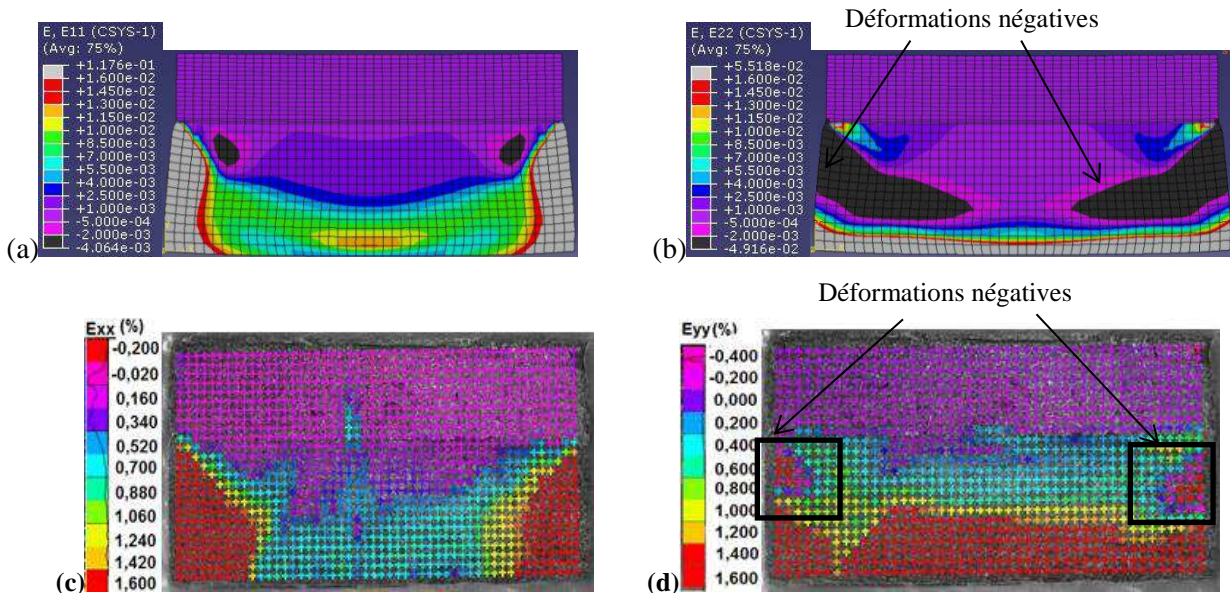


Figure 5-12 : Cas assemblage épicea/BFUP orientation convexe des cernes après 12 jours de chargement. (a) carte de déformations numérique ε_{xx} , (b) carte de déformations numérique ε_{yy} , (c) carte de déformations expérimentale ε_{xx} , (d) carte de déformations expérimentale ε_{yy} .

Dans la deuxième configuration, *i.e.* le cas où l'épicéa est assemblé au BFUP dans le sens concave des cernes, on présente les cartes de déformations ε_{xx} et ε_{yy} après 21 jours de chargement hydrique (Figure 5-13). On remarque que :

- les niveaux de déformations théoriques ne sortent pas de l'intervalle $[-0,6\% ; 7\%]$. Ce qui reste cohérent avec les déformations réelles observées ;
- de plus, les cartes de déformations ε_{xx} expérimentale et numérique sont similaires ;
- par ailleurs, les cartes de déformations ε_{yy} se distinguent par leur allure générale. Dans le calcul, les déformations sont cohérentes avec la diffusion de l'eau dans l'assemblage tel que nous l'avons imposé dans les simulations, avec des déformations importantes aux bords du bois et très faibles au centre. Au contraire, dans l'essai, les déformations ε_{yy} de l'échantillon épicea sens concave-BFUP sont plus importantes au niveau de l'interface qu'au niveau de la face inférieure du bois. On peut voir l'évolution des déformations dans le tableau A3-6 de l'annexe 3. Celui-ci montre que les déformations ε_{yy} évoluent très vite dans le bois au niveau de l'interface ;
- on remarquera que ce phénomène n'a pas été remarqué dans le cas de l'échantillon épicea sens concave-mortier (Annexe 3-Tableau A3-4). Dans ce cas, on observe bien des déformations plus importantes au niveau de la face inférieure et aux bords du bois par rapport au cœur de l'assemblage. Aussi, les déformations sont négligeables au cœur de l'assemblage jusqu'à 10 jours. Les mécanismes observés dans le cas épicea sens concave-BFUP peuvent donc traduire une diffusion de l'eau le long de l'interface collée, liée à un défaut de fabrication de l'échantillon.

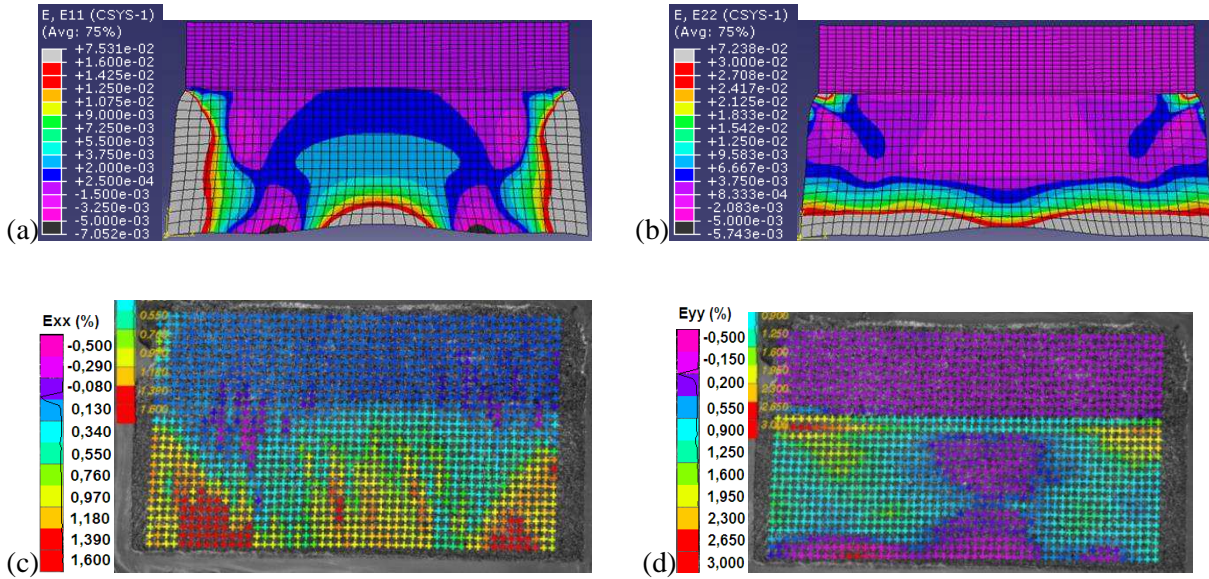


Figure 5-13 : Cas assemblage épïcéa/BFUP orientation concave des cernes après 21 jours de chargement. (a) carte de déformations numérique ε_{xx} , (b) carte de déformations numérique ε_{yy} , (c) carte de déformations expérimentale ε_{xx} , (d) carte de déformations expérimentale ε_{yy} .

Dans la troisième configuration de la série d'essais n°3 (cas de l'assemblage douglas-BFUP), on compare les cartes de déformations après 30 jours de chargement hydrique (Figure 5-14). On observe que les cartes ε_{xx} sont très similaires en termes d'aspect général et de valeurs. Cependant quelques différences sont visibles sur les cartes ε_{yy} , notamment les déformations dans le bois proche de l'interface, qui comme dans le cas précédent sont plus importantes dans la réalité (de l'ordre de 0,9 %) que dans les simulations (≈ 0 -0,2 % au cœur).

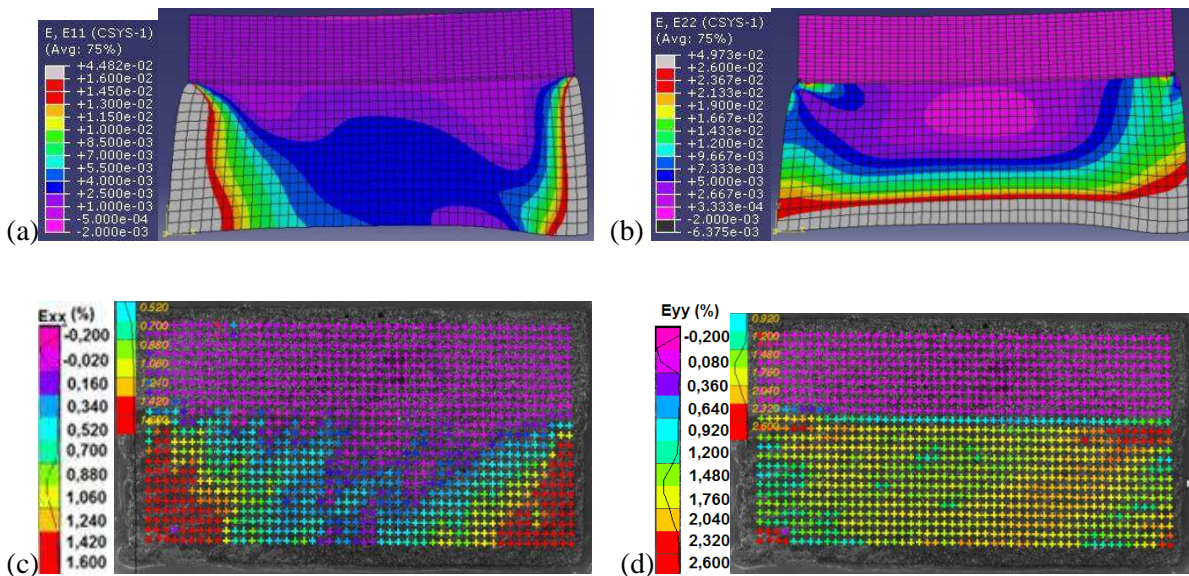


Figure 5-14 : Cas assemblage douglas/BFUP après 30 jours de chargement. (a) carte de déformations numérique ε_{xx} , (b) carte de déformations numérique ε_{yy} , (c) carte de déformations expérimentale ε_{xx} , (d) carte de déformations expérimentale ε_{yy} .

Pour ces trois configurations, les cartes de déformations théoriques sont similaires aux cartes de déformations expérimentales, tant sur l'aspect général que sur les ordres de grandeur des valeurs de déformation. Les divergences constatées dans le bois en zone proche de l'interface sont attribuées d'une manière générale à une maîtrise imparfaite de la diffusion de l'eau dans le sens longitudinal comme nous l'avons déjà observé pour le cas du bois seul, et au modèle qui considère une interface parfaite.

La comparaison des cartes de déformations théoriques aux cartes de déformations expérimentales a donc permis de montrer que le modèle théorique utilisé permet d'avoir une bonne approche des niveaux de déformations observés expérimentalement. Il est alors possible, en estimant les contraintes induites dans l'assemblage par l'humidification de celui-ci, d'avoir une idée des mécanismes potentiels d'endommagement.

5.3.2.2 Estimation des contraintes induites au niveau de l'interface

Dans ce paragraphe, on s'intéresse aux contraintes S_{xx} , S_{yy} et S_{xy} , induites dans les matériaux en des points proches de l'interface et des bords libres dans les trois cas présentés ci-dessus, ceci dans le but d'expliquer les mécanismes d'endommagement, c'est-à-dire la fissuration du BFUP et le décollement de l'interface, observés expérimentalement pour les différents cas d'études.

On notera que dans l'analyse, les contraintes calculées au niveau des bords libres ne sont pas exploitées du fait de potentiels biais dans le calcul numérique dus aux singularités des contraintes S_{yy} , S_{xy} . Les premiers points de mesure ne permettent pas en effet de vérifier les conditions de bord libre (exemple contrainte S_{yy} nulle au bord libre).

Afin de prendre en compte le cas spécifique de rupture au niveau de la connexion, les contraintes de part et d'autre des interfaces bois-colle, béton-colle et dans la colle sont discutées.

a) Cas de la fissuration du béton

La fissure est apparue dans le béton dans le cas de l'assemblage épicea sens convexe-BFUP perpendiculairement au plan de collage. Le béton est donc soumis dans ce cas précis de géométrie du bois, à des contraintes de traction S_{xx} importantes. Pour le vérifier, on considère les contraintes S_{xx} dans le béton, proche de l'interface, le long de l'axe X comme représenté sur la figure 5-15.

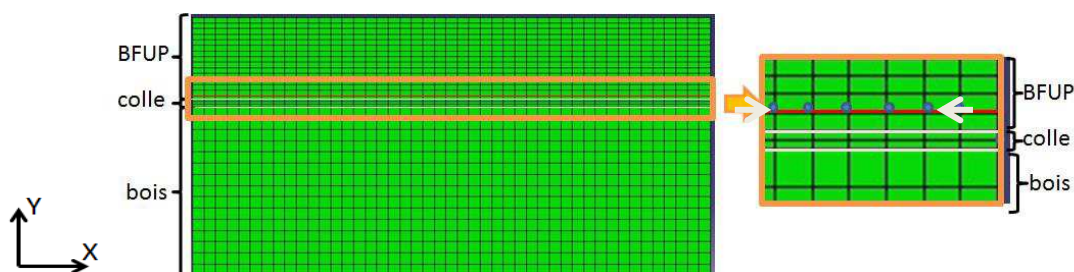


Figure 5-15 : Zone d'observation des contraintes S_{xx} dans le BFUP, proche de l'interface.

La figure 5-16 représente le profil de contraintes S_{xx} induites dans le béton par le gonflement du bois le long de l'axe x après 30 jours de chargement hydrique pour les trois configurations décrites précédemment. On constate sur cette courbe que :

- le béton est le plus sollicité en zone centrale proche de l'interface pour les trois assemblages. Cette remarque est en accord avec la localisation de la fissure observée dans le béton au cœur de l'interface dans le cas épicea sens convexe-BFUP ;
- les contraintes observées dans le cas de l'assemblage épicea sens convexe-BFUP sont beaucoup plus importantes que dans les cas épicea sens concave-BFUP et douglas cernes inclinés-BFUP, ce qui peut expliquer la fissuration du béton dans le premier cas seulement ;
- l'échantillon douglas-BFUP cernes inclinés apparaît comme une situation intermédiaire : on notera que par rapport à l'épicea, le douglas présente des coefficients de dilation environ 1,5 fois inférieurs et des modules plus importants que l'épicea. Il est donc intéressant, de vérifier le profil des contraintes S_{xx} dans le cas de l'épicea avec la configuration des cernes du douglas *i.e.* des cernes inclinés.

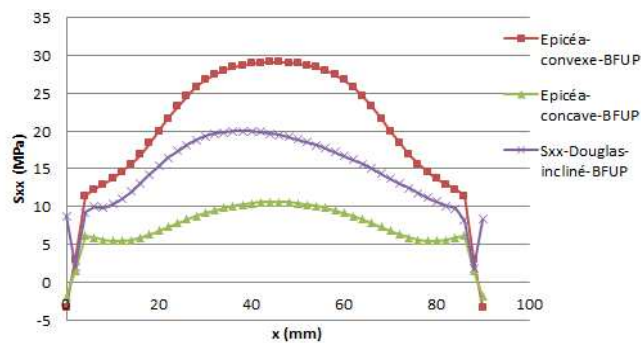


Figure 5-16 : Profil de contraintes S_{xx} induites dans le béton, le long de l'axe x proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique pour les cas épicea convexe-BFUP, épicea concave-BFUP et douglas incliné-BFUP.

Les mêmes calculs ont été appliqués au cas épicea cernes inclinés-BFUP. La figure 5-17 compare les profils de contraintes S_{xx} des cas épicea sens concave-BFUP et épicea cernes inclinés-BFUP. Le cas épicea incliné-BFUP donne des résultats comparables au cas épicea cernes concaves qui est apparu comme le cas le moins défavorable.

Le cas douglas-BFUP est intéressant à considérer. La configuration de cette éprouvette est représentée sur la figure 5-7 *i.e.* avec une inclinaison des cernes. Si l'on prend en considération l'influence de l'orientation des cernes sur la résistance au cisaillement de l'assemblage (chapitre 3 - essais Push-Out), les orientations concaves et convexes sont plutôt défavorables avec la rupture entre les cernes du bois, alors que la configuration inclinée donne les meilleurs résultats. Il est donc satisfaisant de remarquer que la géométrie des cernes inclinés donne de bons résultats, à la fois pour les autocontraintes d'origine hydro-mécanique et pour la résistance en cisaillement en quasi statique.

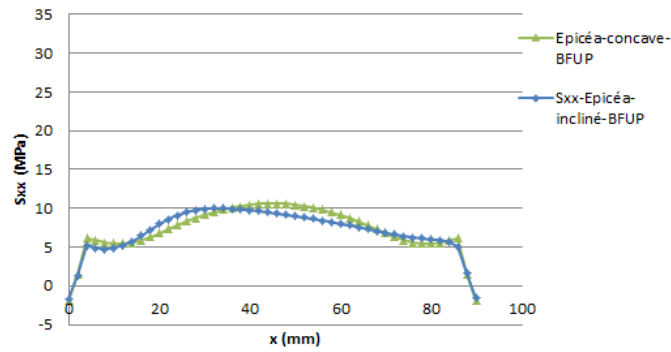


Figure 5-17 : Profil de contraintes S_{xx} induites dans le béton, le long de l'axe x proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique pour les cas épicea concave-BFUP, épicea incliné-BFUP.

Les valeurs des contraintes S_{xx} calculées correspondent parfaitement aux observations expérimentales. Nous pouvons expliquer la fissuration du béton dans le cas de l'assemblage épicea sens convexe-BFUP par une contrainte de traction dans le béton trop importante. Aussi, nous avons montré que la géométrie des cernes du bois inclinés par rapport au plan de collage est une configuration très satisfaisante en ce qui concerne les contraintes S_{xx} existantes dans le béton.

b) Cas du décollement de l'interface

Dans ce qui suit, on s'intéresse au décollement de l'interface. Dans le cadre de notre étude, le décollement peut être la conséquence de deux types de sollicitation :

- des contraintes d'arrachement, définies par les contraintes verticales S_{yy} ;
- des cisaillements d'interface, définis par les contraintes de cisaillement S_{xy} .

Estimation des contraintes S_{yy}

Le décollement de l'interface a été observé dans les cas des assemblages épicea convexe-mortier et douglas incliné-BFUP (avec l'observation de champs de 1 cm) au niveau de l'interface bois-colle. On souhaite donc vérifier le niveau de contraintes S_{yy} induites dans le bois proche de l'interface et dans la colle (Figures 5-18 et 5-19).

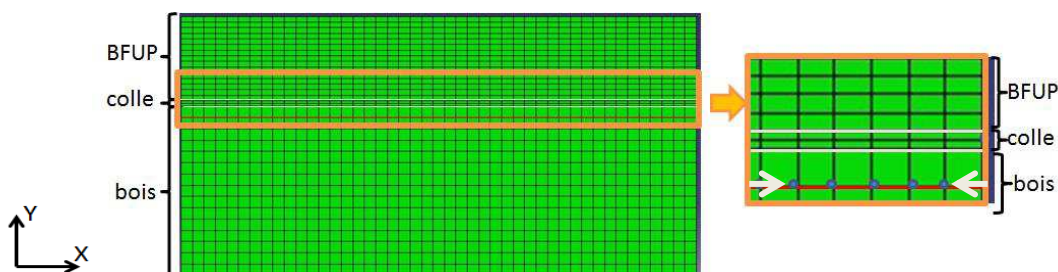


Figure 5-18 : Zone d'observation des contraintes S_{yy} dans le bois, proche de l'interface.

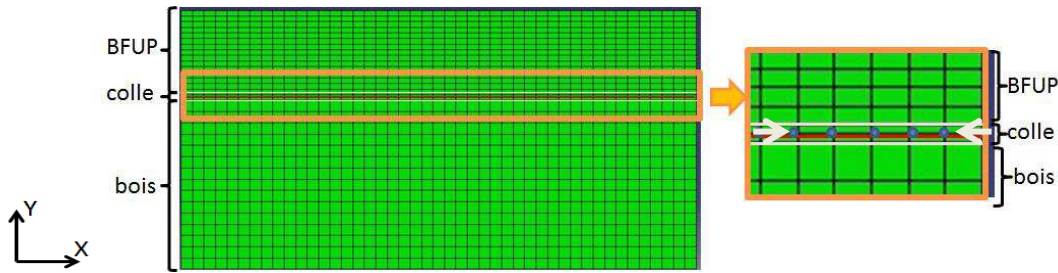


Figure 5-19 : Zone d'observation des contraintes S_{yy} dans la colle.

La figure 5-20 représente le profil de contraintes S_{yy} dans le bois, et dans la colle le long de l'axe x après 30 jours de chargement hydrique. On constate sur cette courbe que :

- les profils de contraintes sont très similaires dans le bois et dans la colle proche de l'interface pour chacun des cas étudiés. L'interface étant considérée comme parfaite, il y a continuité des contraintes S_{yy} à l'interface ;
- pour les deux cas épicéa convexe-BFUP et douglas incliné-BFUP, deux pics de contraintes de traction sont observables de part et d'autre de la zone centrale. Ces contraintes peuvent induire un décollement de l'interface, ce que nous observons expérimentalement pour les cas épicéa convexe-BFUB, et douglas incliné-BFUP ;
- le cas épicéa incliné-BFUP a aussi été étudié, les contraintes au niveau des deux pics atteignent des valeurs aussi importantes que dans le cas du douglas incliné –BFUP ;
- le cas où les cernes sont positionnés dans le sens concave apparaît comme étant plus favorable, avec un profil de contrainte constant le long de l'interface.

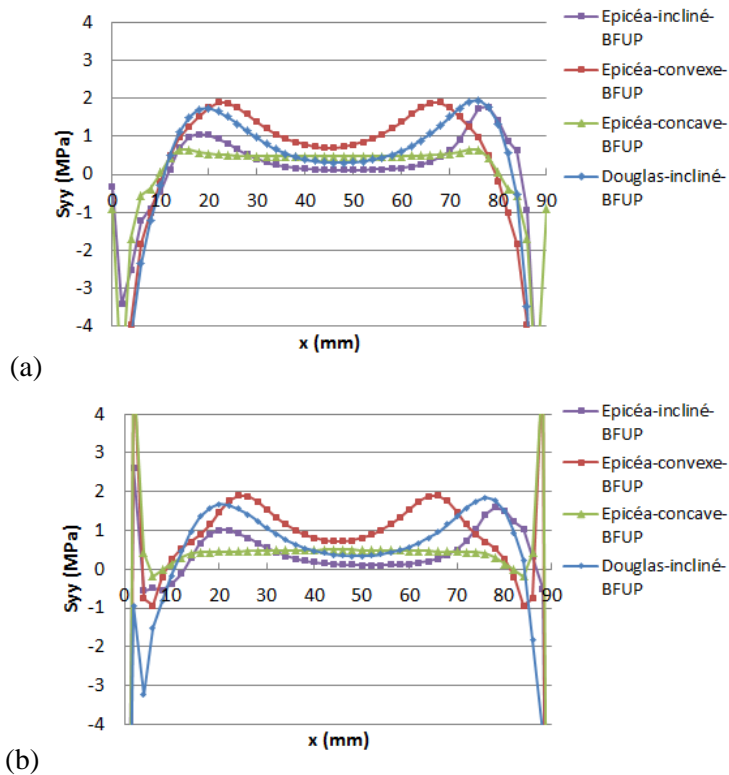


Figure 5-20 : (a) Profil de contraintes S_{yy} induites dans le bois, (b) profil de contraintes S_{yy} dans la colle le long de l'axe X proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique.

L'analyse des contraintes S_{yy} peut expliquer certains décollements observés expérimentalement. Selon les profils calculés, il est plus probable d'observer une rupture de l'interface dans les cas où le bois est positionné dans les sens convexe et incliné du fait de l'existence de deux pics de contraintes d'arrachement à proximité de l'interface. La configuration bois concave-BFUP apparaît plus favorable en termes de contraintes d'arrachement au niveau de l'interface.

Estimation des contraintes S_{xy}

On souhaite vérifier les niveaux des contraintes de cisaillement dans le bois proche de l'interface et dans la colle (Figures 5-18 et 5-19).

La figure 5-21 présente les profils des contraintes de cisaillement S_{xy} après 30 jours de chargement hydrique dans le bois le long de l'axe X proche de l'interface et dans la colle. La figure montre des profils similaires pour toutes les configurations :

- les contraintes de cisaillement sont faibles et varient très peu le long de l'axe X dans la colle et dans le bois (même ordre de grandeur) ;
- on observe des pics de contrainte à l'approche de bords. Les pics de cisaillement visibles à proximité des bords révèlent une zone cisailée, en accord avec les matériaux de type « multicouches ». Une étude où le maillage serait affiné pourrait aider à interpréter plus finement ce phénomène, notamment pour expliquer les divergences entre les différents cas d'étude (influence de l'orientation des cernes et des matériaux d'études).

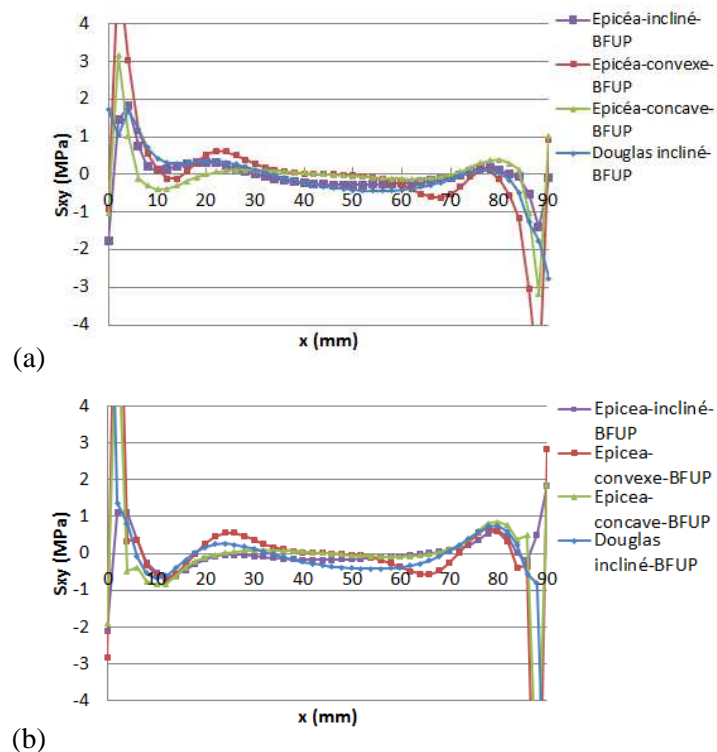


Figure 5-21 : Profil de contraintes S_{xy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique.

L'observation des contraintes de cisaillement S_{xy} ne permet pas de conclure quant à un possible décollement par glissement d'interfaces. Par ailleurs, un critère de rupture par cisaillement serait aussi à quantifier pour les différents cas afin de conclure sur l'endommagement potentiel.

c) Conclusion

L'analyse des profils de contraintes dans les matériaux à proximité des interfaces aide à l'interprétation des mécanismes d'endommagement observés expérimentalement :

- (1) en estimant les contraintes S_{xx} dans le béton, nous avons mis en évidence l'existence de contraintes de traction horizontale en zone centrale qui peut induire la fissuration du béton, ce qui va dans le sens des observations expérimentales ;
- (2) pour un même bois, l'intensité de la contrainte S_{xx} dans le béton dépend de l'orientation des cernes. Nous avons montré que ces contraintes sont minimisées si les cernes du bois sont inclinés ou orientés dans le sens concave par rapport au plan de collage ;
- (3) les contraintes S_{yy} montrent l'existence de contraintes d'arrachement au niveau de l'interface plus importantes pour les deux configurations bois convexe-BFUP et bois incliné-douglas. Le cas sens concave-BFUP est le plus satisfaisant en termes de contraintes d'arrachement ;
- (4) nous ne pouvons pas conclure quant à un éventuel décollement par glissement au niveau des bords, il faudrait réaliser une analyse plus fine notamment pour vérifier les contraintes à proximité de bords.

5.3.3 Synthèse

Les travaux de validation de la simulation développée dans le cadre de ce travail s'organisent en plusieurs étapes.

- (1) Nous avons validé les résultats numériques obtenus pour le bois seul. Pour cela, nous avons réalisé dans un premier temps la simulation du comportement hydromécanique des bois d'épicéa et de douglas à partir des données mesurées expérimentalement (chapitre 2). Les simulations ont été comparées aux essais de corrélation d'images. Les résultats numériques sont cohérents avec les essais, les aspects globaux des cartes de déformations sont très proches et les valeurs sont du même ordre de grandeur. Les conditions initiales (la diffusion de l'eau le long des fibres du bois) ne sont cependant pas complètement maîtrisées, et la diffusion de l'eau est plus rapide expérimentalement que numériquement en raison d'une étanchéité imparfaite des joints de silicone utilisés. Les résultats sont toutefois proches de ce que nous avons obtenu expérimentalement notamment dans les premiers jours de chargement.
- (2) Nous avons simulé le comportement sous chargement hydrique d'assemblages bois-béton. Comme pour le cas du bois seul, nous avons comparé les résultats numériques aux résultats expérimentaux. Les résultats sont cohérents, les déformations calculées sont du même ordre de grandeur que les déformations mesurées pour chaque cas étudiés. D'une manière générale, on retrouve des déformations expérimentales légèrement supérieures aux déformations numériques, ce qui a été expliqué par une mauvaise étanchéité du joint silicone.
- (3) Enfin, nous avons fait une étude qualitative en estimant les contraintes induites dans les matériaux proches de l'interface et des bords libres pour discuter des mécanismes d'endommagement observés expérimentalement. Nous avons montré que :
 - la fissuration du béton perpendiculairement au plan de collage s'explique par une traction trop importante du béton. Les valeurs des contraintes S_{xx} calculées dans le béton sont cohérentes avec les résultats expérimentaux. Nous avons montré que les deux configurations cernes inclinées et cernes concaves diminuent les risques de fissuration du béton ;
 - le décollement de l'interface s'explique essentiellement par la présence de contraintes d'arrachement (S_{yy}) au niveau de l'interface. Le cas épicéa-concave présente le profil de contrainte S_{yy} le plus favorable et permet de minimiser ainsi la rupture de l'interface ;
 - pour toutes les configurations, les contraintes de cisaillement varient très peu le long de l'axe X. Cependant, on observe une augmentation du cisaillement à proximité des bords, et il faudrait procéder à une analyse plus fine pour évaluer le cisaillement aux bords, et ainsi préciser quelle configuration permet de minimiser les risques de rupture de l'interface ;
 - les échantillons de la série 4 d'essais du chapitre 4 ont aussi été modélisés (non présentés dans le mémoire). Dans le cas de l'échantillon épicéa convexe avec rainures, l'analyse des contraintes a montré un risque de fissuration du béton et de décollement de l'interface aussi important que pour le cas épicéa convexe sans rainure. Pour le cas du douglas contenant toutes les lamelles de bois, nous avons constaté un risque de fissuration diminué par rapport au cas douglas simple, qui peut

être dû au positionnement différent des cernes de la lamelle de bois assemblée au béton. Le risque de décollement par arrachement est aussi important.

L'étude faite à l'échelle du laboratoire n'est cependant pas représentative des phénomènes qui peuvent être observés à l'échelle d'une structure réelle. En effet sur un assemblage de la taille des échantillons testés, l'équilibre hygroscopique est atteint entre 200 et 250 jours selon le bois utilisé. En augmentant le volume de l'assemblage, l'équilibre hygroscopique est fortement retardé. Dans ce cas, on peut penser que l'évolution des contraintes induites à proximité de l'interface en zone centrale sera beaucoup plus lente. Nous allons vérifier cet aspect dans le paragraphe suivant, dans lequel nous allons appliquer nos calculs à un ouvrage de taille réelle.

5.4 Changement d'échelle : application à un ouvrage réel

La simulation est réalisée pour le pont mixte bois-béton proposé par le groupe de recherche du projet européen NR2C (New Road Construction Concept) (chapitre 1, Figure 1-8b). Il s'agit d'un tablier de 10 m de portée et de 2,5 m de largeur, constitué de quatre poutres en BLC de largeur 24 cm et de hauteur 60 cm, équidistantes, sur lesquelles est connectée par collage une dalle en béton fibré ultra performant de 7 cm d'épaisseur (Figure 5-22).

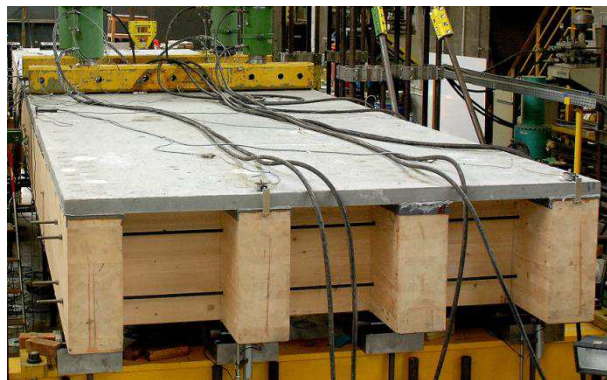


Figure 5-22 : Photo structure mixte bois-béton – tablier NR2C.

Dans les simulations présentées dans ce paragraphe, nous gardons les mêmes données matériaux, et les mêmes conditions initiales et conditions aux limites que dans les calculs précédents afin d'estimer les contraintes dans les trois matériaux (béton, colle, bois) et d'en déduire les zones d'endommagement potentiel. La structure, initialement à l'équilibre à $H_R=55\%$ est soumise à $H_R=97\%$ pendant 300 jours. Il est supposé que le transfert de l'eau selon le sens des fibres est empêché.

5.4.1 Caractéristiques géométriques de la section étudiée

Nous avons utilisé des éléments quadrangles linéaires de 5 mm de côté dans le bois et dans le béton. Le maillage a été légèrement affiné dans la résine (5 mm*0,5 mm, quatre éléments dans la direction Y). La figure 5-23 présente le maillage et la géométrie adoptés ainsi que les conditions de chargement.

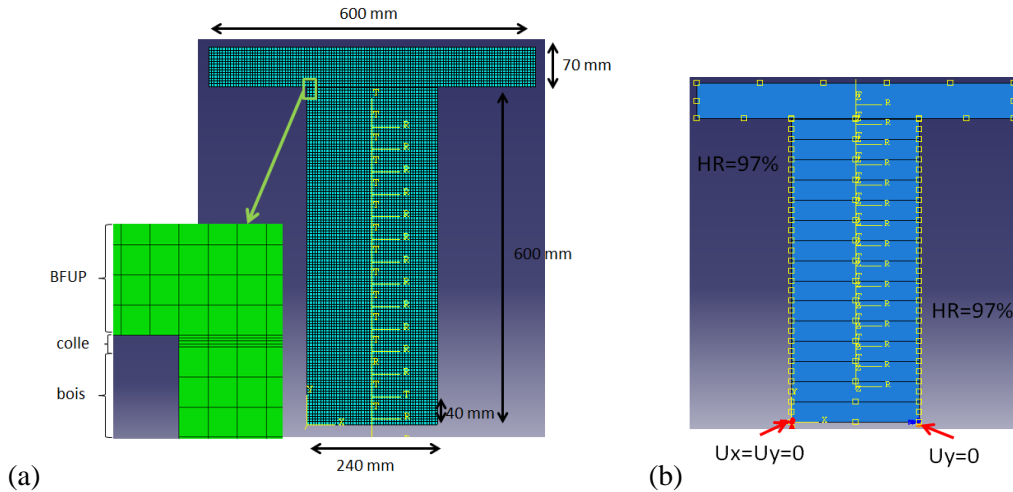


Figure 5-23 : (a) Géométrie, dimension et maillage utilisé, (b) conditions aux limites et initiales.

Afin d'identifier les risques d'endommagement au niveau de l'interface, en lien avec l'orientation des cernes par rapport au plan de collage, nous avons fait varier le sens des cernes des lamelles de bois. Les deux configurations étudiées sont représentées par la figure 5-24. Dans le premier cas, toutes les lamelles de bois sont orientées dans le sens convexe des cernes, et dans le second cas, dans le sens concave.

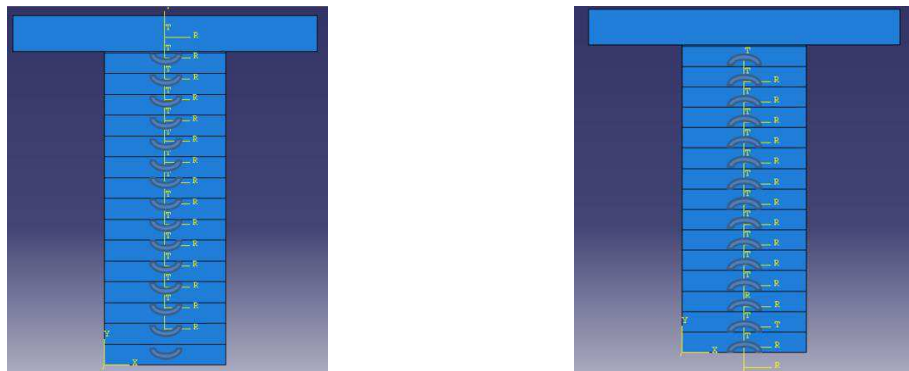


Figure 5-24 : Schématisation des deux configurations étudiées (a) sens convexe et (b) sens concave.

5.4.2 Calcul du champ de teneur en eau

La figure 5-25 présente le champ d'humidité relative H_R dans le bois à différents stades du chargement hydrique. Ces images montrent une évolution très lente de la teneur en eau dans le bois, l'équilibre n'étant

pas atteint même après 300 jours de chargement hydrique, échéance à laquelle la diffusion de l'eau ne s'est faite que sur une épaisseur de 3 cm environ.

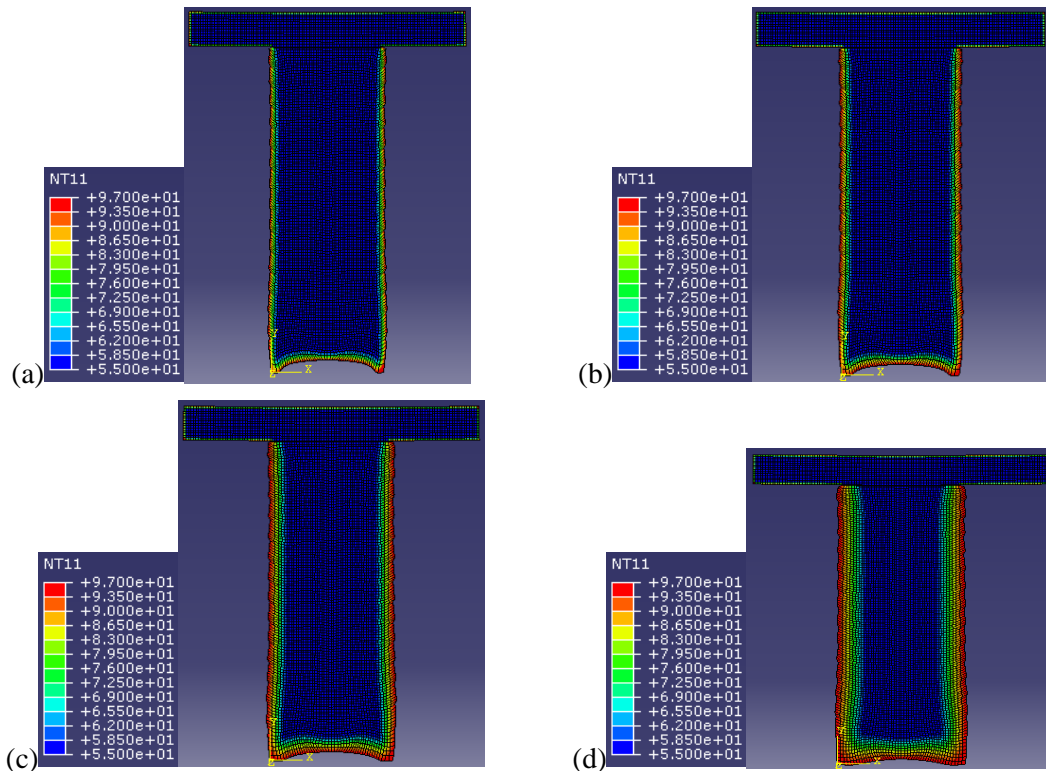


Figure 5-25 : Humidité relative calculée dans le bois (en relation avec la teneur en humidité du bois) aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours.

5.4.3 Orientation convexe des cernes

On présente dans un premier temps les résultats obtenus pour le cas où toutes les lamelles de bois d'épicéa sont orientées dans le sens convexe des cernes.

Les figures 5-26 et 5-27 présentent respectivement les cartes de contraintes S_{xx} , et le profil de contrainte dans le béton proche de l'interface, le long de l'axe X, après 10 jours, 30 jours, 90 jours et 300 jours de chargement sous HR=97 %.

Les cartes de contraintes S_{xx} montrent dès 10 jours de la traction au cœur de l'interface et de la compression à proximité des bords. Cette tendance s'intensifie avec le temps de chargement. La courbe représentant le profil de contrainte S_{xx} dans le béton le long de l'axe X (Figure 5-27) montre un pic de traction important au cœur de l'interface qui peut induire la fissuration du béton. On peut remarquer que la contrainte évolue beaucoup plus lentement que dans les calculs à l'échelle du laboratoire.

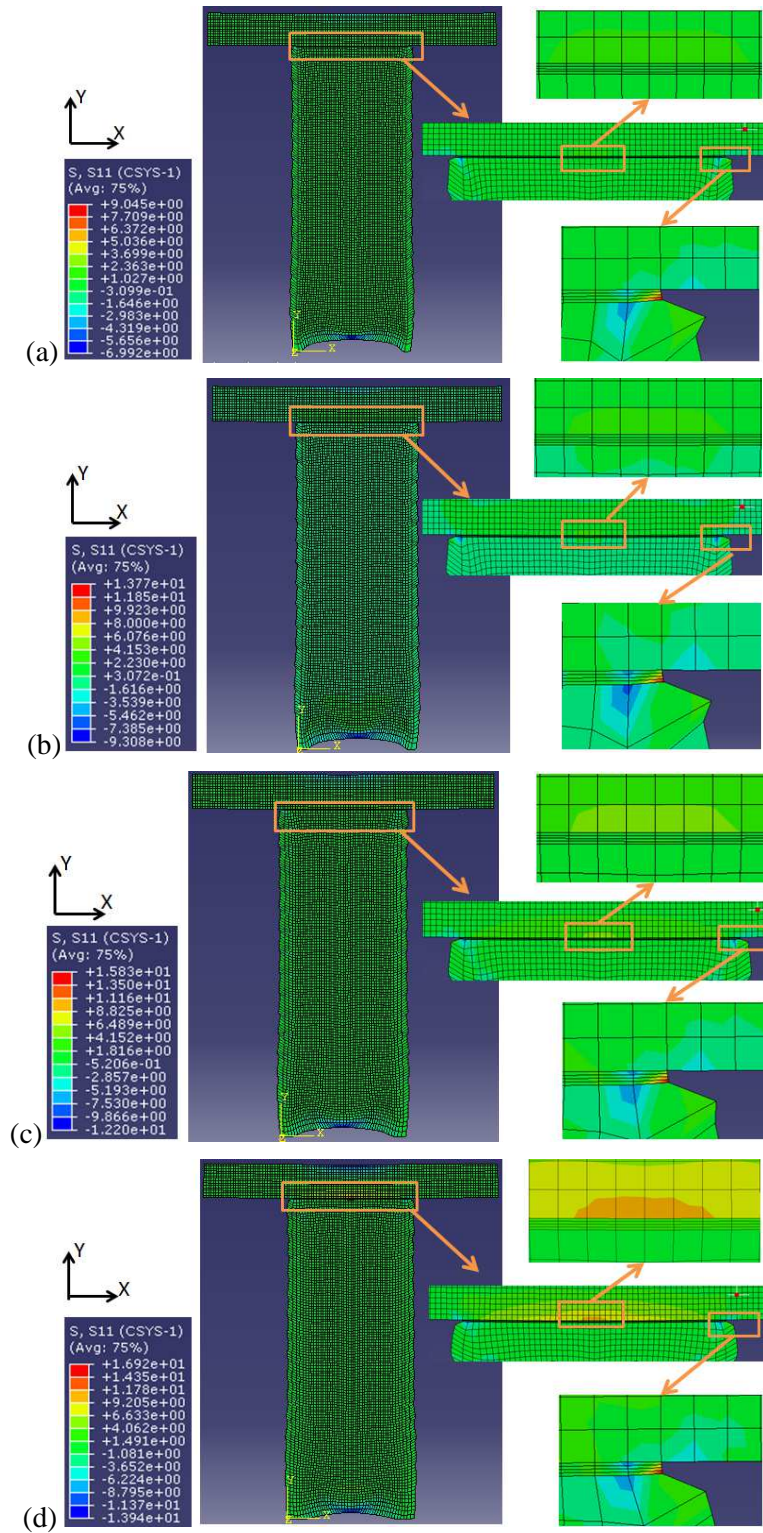


Figure 5-26 : Contraintes S_{xx} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens convexe.

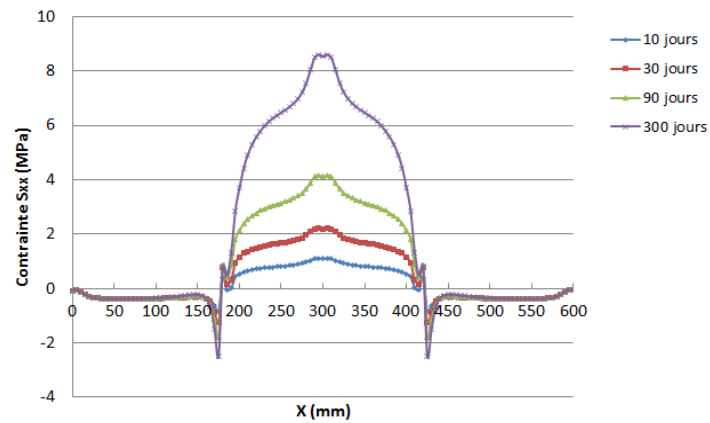


Figure 5-27 : Contraintes S_{xx} dans le béton, proche de l'interface le long de l'axe X à 10, 30, 90 et 300 jours, cas sens convexe.

Les cartes de contraintes S_{yy} représentées par la figure 5-28 montrent des contraintes d'arrachement au cœur de l'interface, et des contraintes de compression à proximité des bords. Les profils de contraintes dans le bois et dans la colle à proximité de l'interface (Figure 5-29) montrent un pic de traction au cœur de l'interface qui augmente avec le temps. Ce pic peut induire un décollement par arrachement démarrant au cœur de l'interface. De la compression verticale est visible aussi et semble s'étendre vers le cœur de l'interface au cours du chargement hydrique.

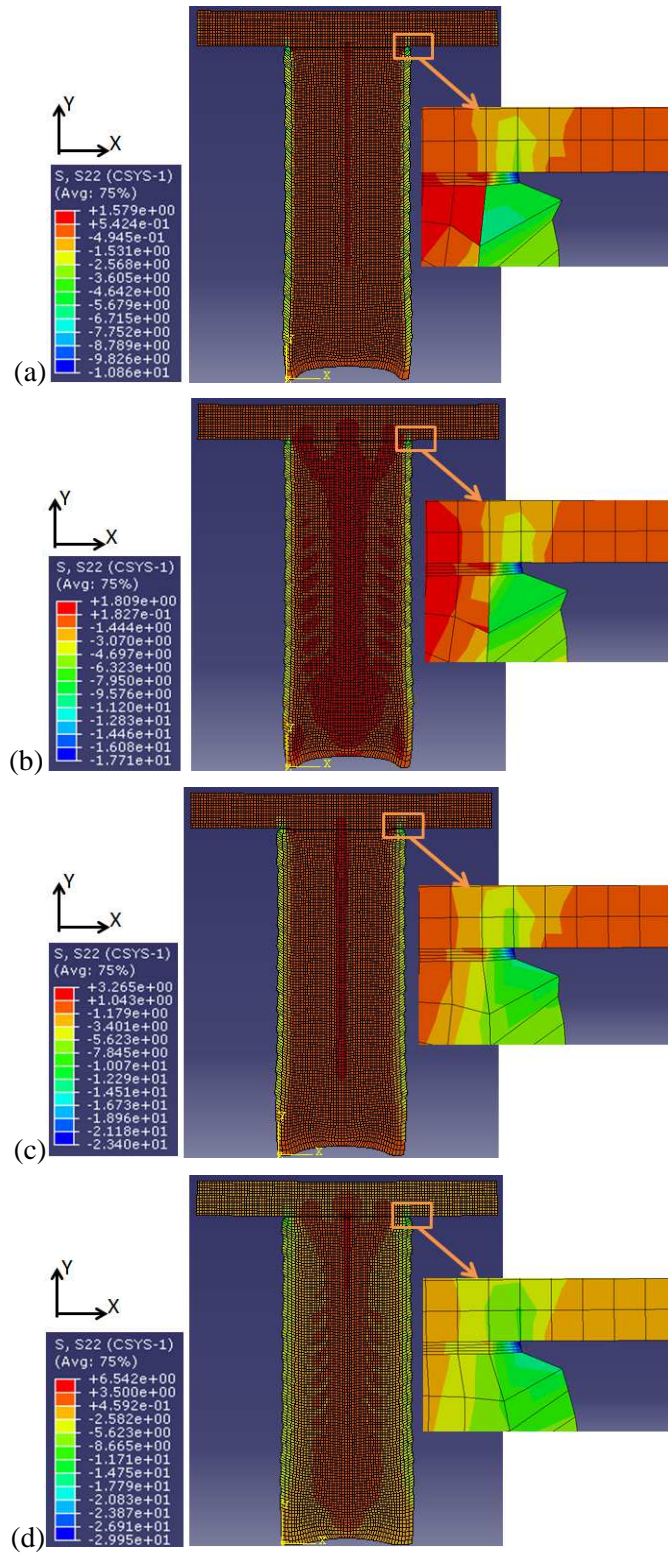


Figure 5-28 : Contraintes S_{yy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens convexe.

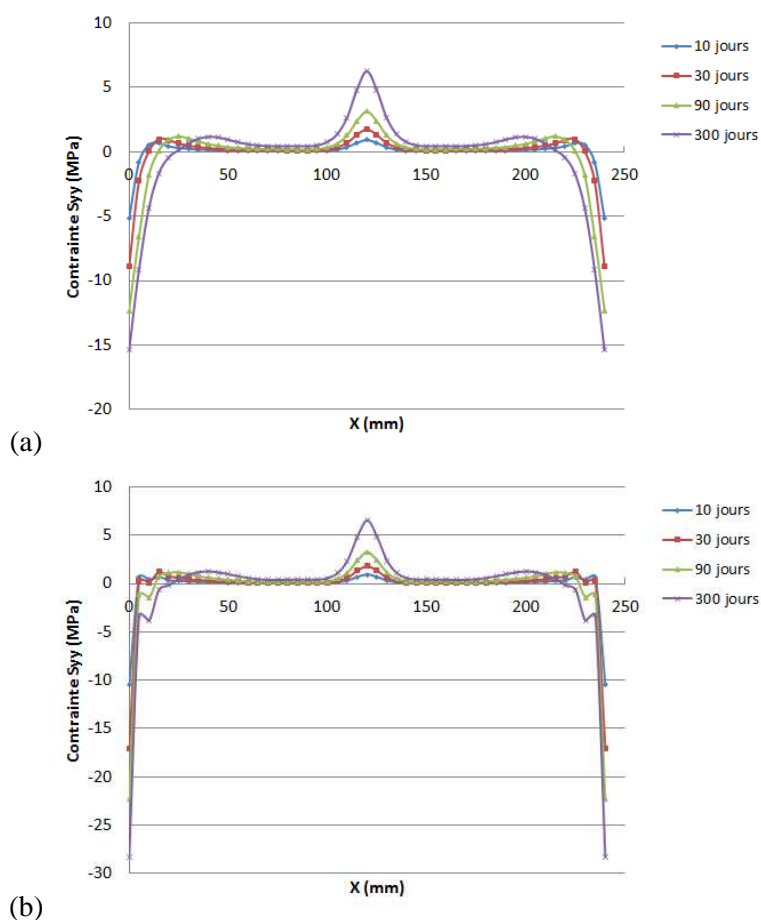


Figure 5-29 : Profil de contraintes S_{yy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens convexe.

Les figures 5-30 et 5-31 représentent respectivement les cartes de contraintes S_{xy} , et le profil de contrainte de cisaillement dans le béton proche de l'interface, le long de l'axe X , après 10 jours, 30 jours, 90 jours et 300 jours de chargement sous $HR=97\%$.

Sur les cartes de contraintes S_{xy} , on remarque peu de cisaillement le long de l'interface (Figures 5-30 et 5-31). En revanche, du cisaillement est observable aux bords et semble s'étendre vers l'intérieur de la structure au cours du chargement hydrique (Figure 5-31).

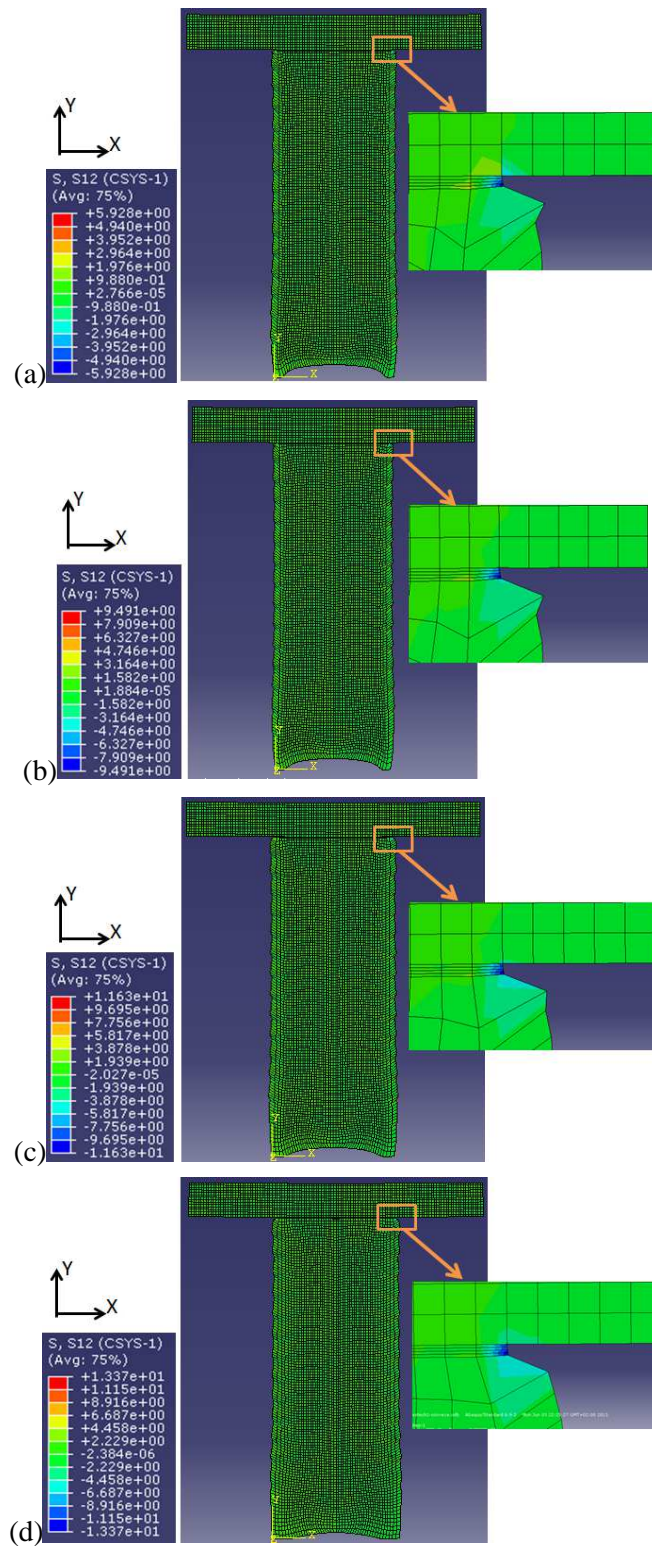


Figure 5-30 : Contraintes S_{xy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens convexe.

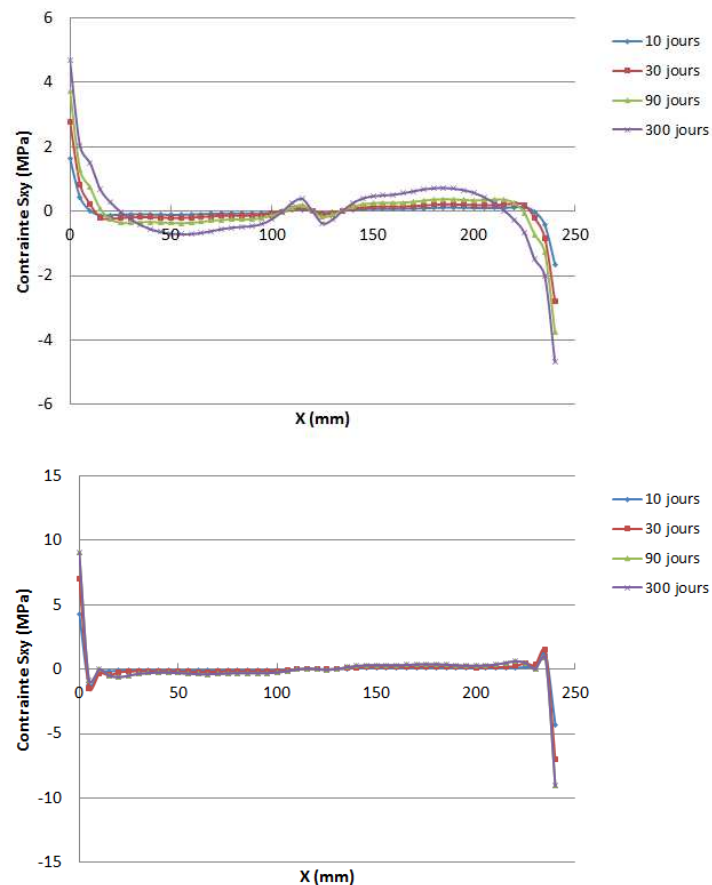


Figure 5-31 : Profil de contraintes S_{xy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens convexe.

Lorsque les lamelles sont toutes collées dans le sens le plus défavorable, c'est-à-dire le sens convexe des cernes, les résultats montrent que :

- le béton est sollicité en traction horizontale au cœur de l'interface et que l'intensité de la contrainte augmente au cours du chargement et peut provoquer la fissuration du béton ;
- l'interface est sollicitée au centre de la connexion par des contraintes d'arrachement, et aux bords par des contraintes de cisaillement.

5.4.4 Orientation concave des cernes

Ces résultats peuvent être comparés au cas plus favorable où toutes les lamelles de bois sont assemblées dans le sens concave des cernes. Nous présentons dans le paragraphe suivant, les résultats obtenus dans le cas où toutes les lamelles de bois sont assemblées dans le sens concave des cernes.

Les figures 5-32 et 5-33 décrivent respectivement les cartes de contraintes S_{xx} , et le profil de contrainte dans le béton proche de l'interface, le long de l'axe X, après 10 jours, 30 jours, 90 jours et 300 jours de chargement sous HR=97 %. Celles-ci montrent la présence de contraintes de traction au cœur de l'interface très faibles et qui évoluent très peu au cours du chargement.

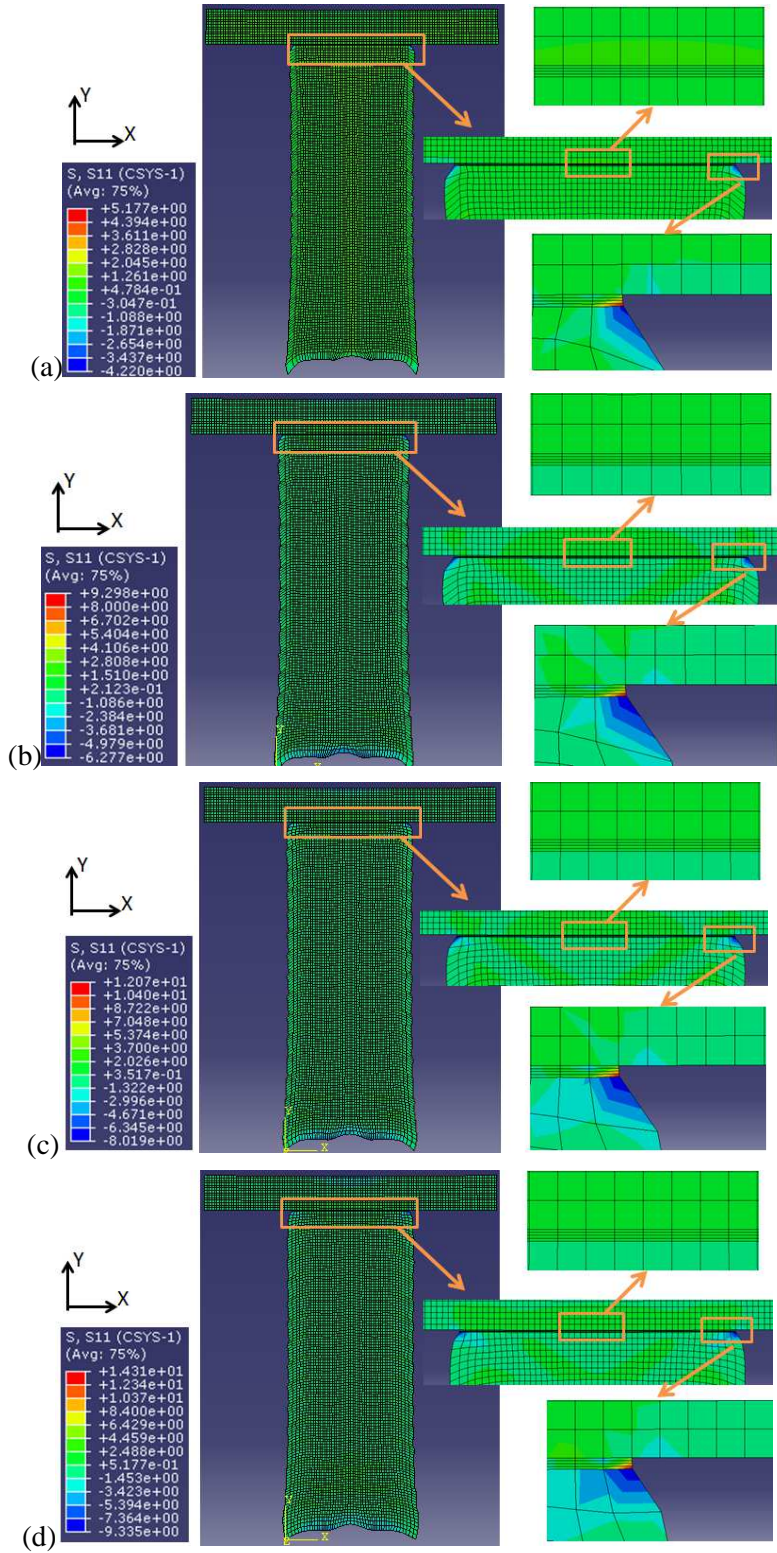


Figure 5-32 : Contraintes S_{xx} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens concave.

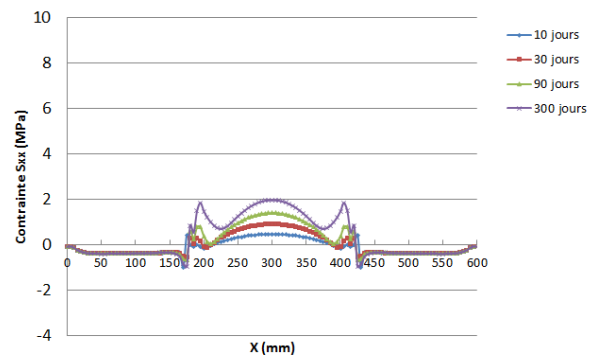


Figure 5-33 : Contraintes S_{xx} dans le béton, proche de l'interface le long de l'axe X à 10, 30, 90 et 300 jours, cas concave.

Les figures 5-34 et 5-35 décrivent les cartes de contraintes S_{yy} , et le profil de contrainte dans le bois proche de l'interface et dans la colle le long de l'axe X, aux mêmes échéances de 10, 30, 90 et 300 jours. Les résultats montrent que :

- des contraintes de traction sont observables et s'étendent sur l'ensemble de l'interface. La courbe représentant les profils de contraintes confirme cette observation et met en évidence que les contraintes sont très faibles et évoluent très peu au cours du chargement ;
- des contraintes de compression sont concentrées au niveau de l'interface aux deux bords extérieurs, comme pour le cas précédemment étudié.

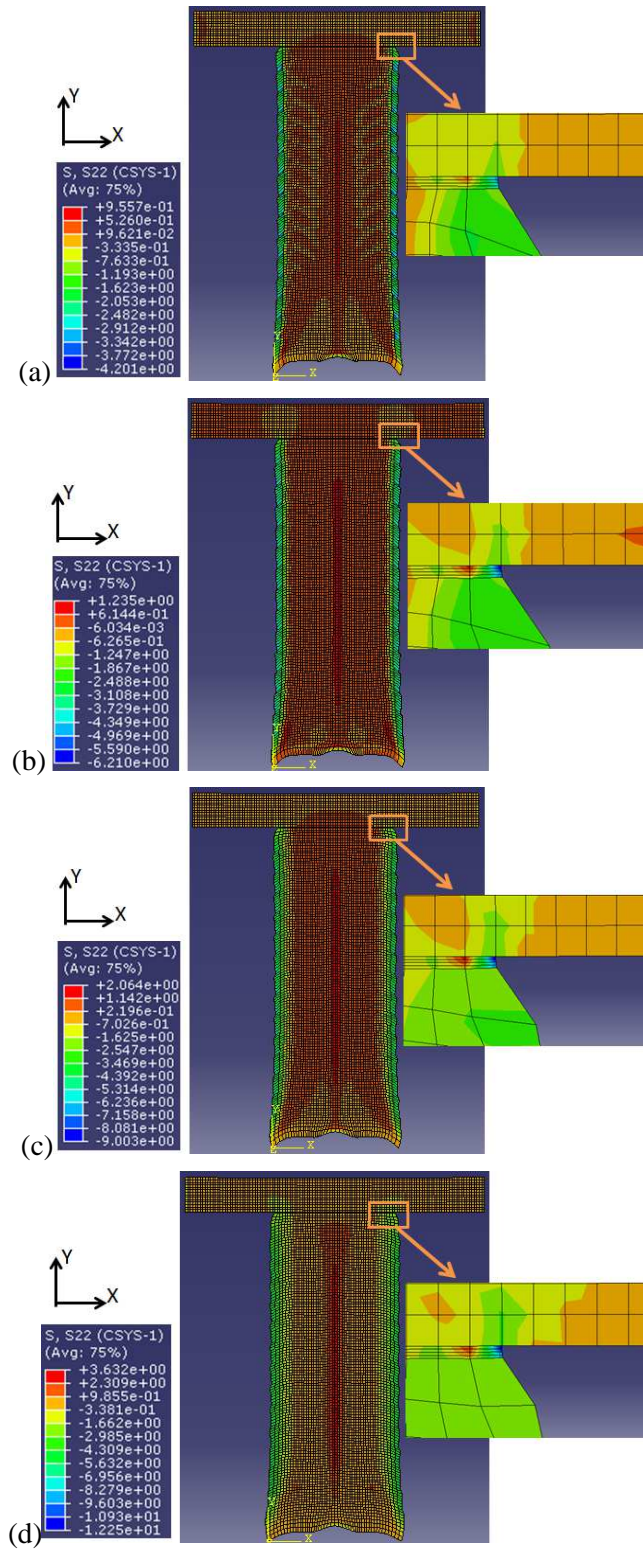


Figure 5-34 : Contraintes S_{yy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens concave.

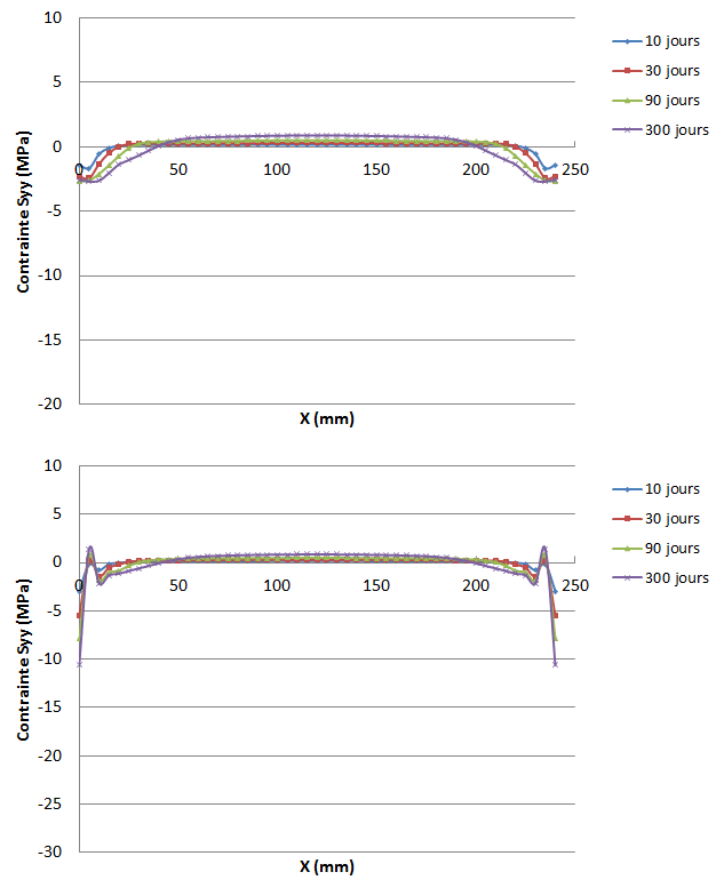


Figure 5-35 : Profil de contraintes S_{yy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens concave.

Les figures 5-36 et 5-37 décrivent les cartes de contraintes S_{xy} , et le profil de contrainte dans le bois proche de l'interface et dans la colle le long de l'axe X, aux mêmes échéances de 10, 30, 90 et 300 jours.

Les résultats montrent :

- sur les cartes des contraintes S_{xy} , on remarque très peu de cisaillement le long de l'interface ;
- des contraintes de cisaillement sont concentrées au niveau de l'interface aux deux bords extérieurs, comme pour le cas précédemment étudié, et semblent s'étendre vers l'intérieur de la structure au cours du chargement hydrique.

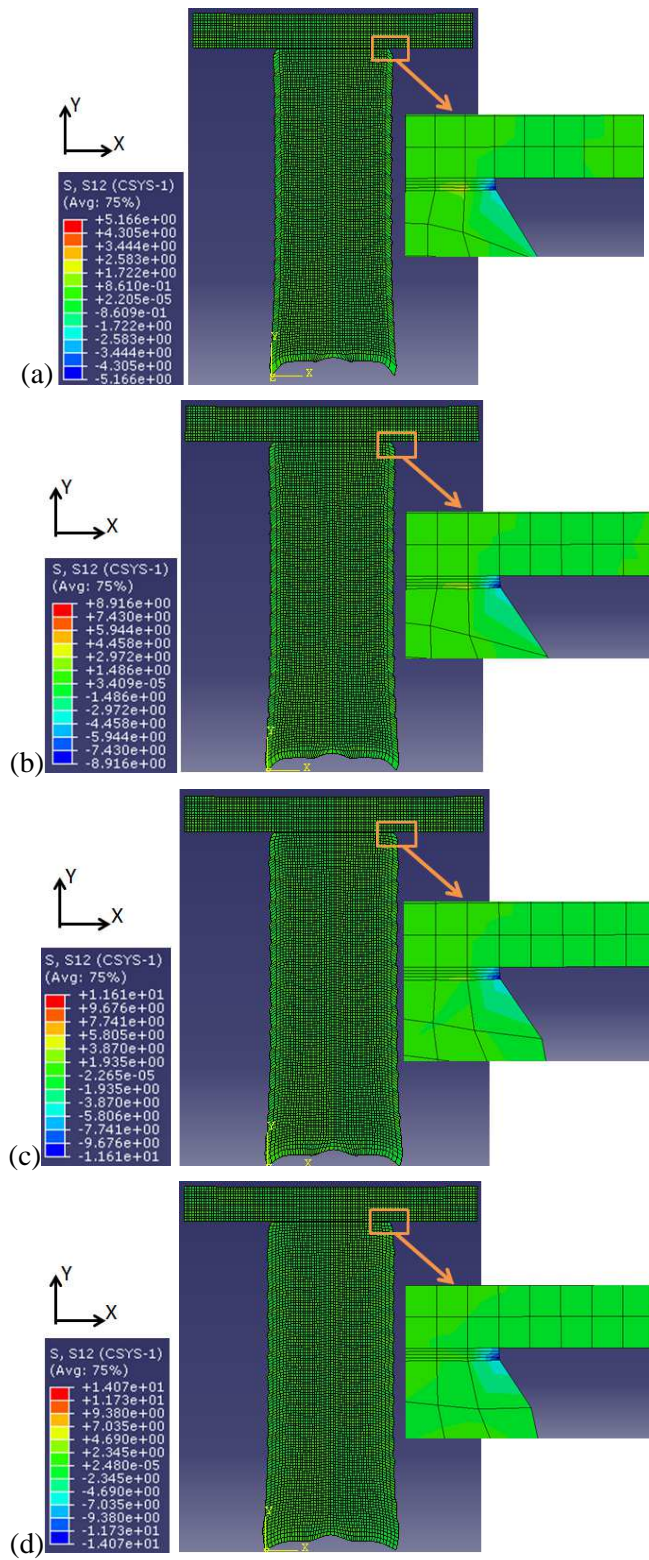


Figure 5-36 : Contraintes S_{xy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens concave.

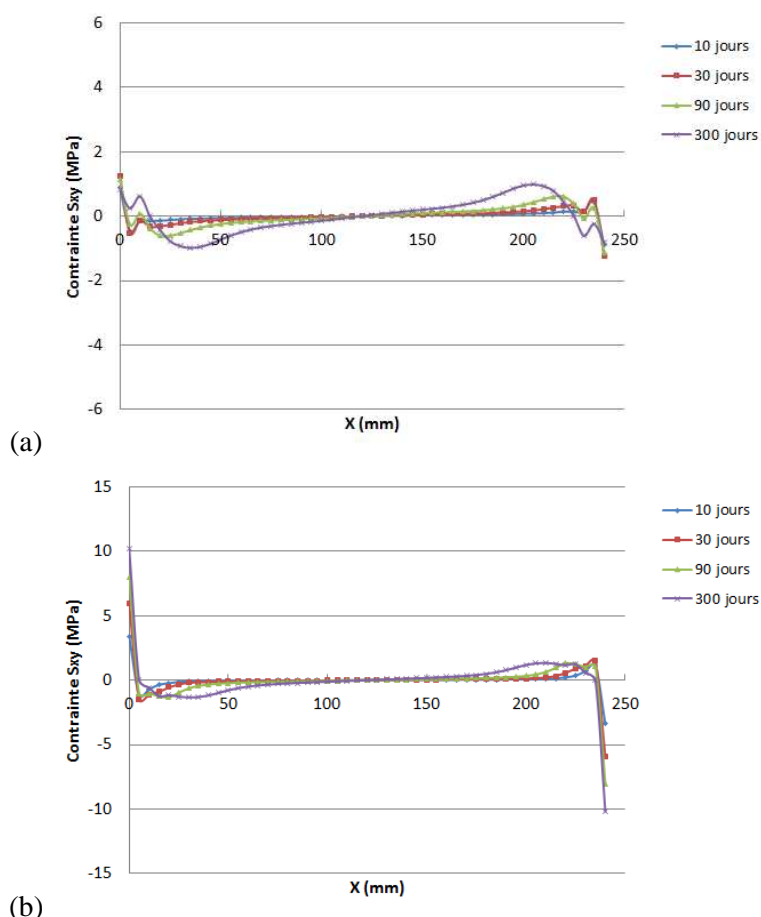


Figure 5-37 : Profil de contraintes S_{xy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens concave.

5.4.5 Synthèse

Nous avons réalisé, dans cette partie, une étude préliminaire dont l'objectif est d'évaluer les contraintes induites par les déformations hydriques du bois au niveau de l'interface à l'échelle d'un ouvrage réel. Pour cela nous avons repris la géométrie du pont NR2C que nous avons soumis à HR=97 % pendant 300 jours. Ces conditions hydriques ne sont pas représentatives de la réalité au regard de la période d'humidification, mais permettent d'avoir une idée des valeurs de contraintes de compression, de traction et de cisaillement existant en zone proche de l'interface. Deux configurations ont été étudiées, la situation la moins favorable avec les lamelles de bois dans le sens convexe, et la plus favorable avec les lamelles de bois dans le sens concave des cernes.

L'étude a mis en évidence l'effet du sens des cernes sur les mécanismes d'endommagement potentiels :

- l'assemblage dont les lamelles de bois sont assemblées dans le sens convexe est le plus défavorable. Le gonflement des lamelles de bois induit des contraintes importantes de traction horizontales dans le béton, pouvant provoquer sa fissuration, ainsi que des contraintes d'arrachement au cœur de l'assemblage qui peuvent traduire un décollement de l'interface ;

- l'assemblage avec les cernes orientés dans le sens concave est satisfaisant avec des contraintes de traction verticales qui évoluent très peu et des contraintes d'arrachement négligeables le long de l'interface ;
- en revanche le sens des cernes semble ne pas avoir d'effet sur les contraintes de cisaillement observées au bord de l'interface. Cet aspect doit cependant être approfondi.

5.5 Conclusion

L'objectif de l'étude présentée dans ce chapitre est de valider un modèle qui permette d'analyser l'évolution des contraintes induites dans l'assemblage soumis à un test d'humidification, pour donner *in fine* des recommandations qui optimisent la tenue de l'assemblage.

Dans ce chapitre, nous avons choisi un modèle numérique par éléments finis pour simuler le comportement hydromécanique d'un assemblage bois-béton collé. Ce modèle non linéaire a été adapté à Abaqus. Nous avons introduit dans les calculs le caractère orthotropique du bois ainsi que la dépendance des propriétés du bois avec l'humidité par des hypothèses simplificatrices. Aussi, les incertitudes de mesures expérimentales et les hétérogénéités intrinsèques du bois sont autant de paramètres qui peuvent expliquer les divergences entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux. Nous considérons donc dans cette étude qu'il n'est pas nécessaire de complexifier ce modèle, celui-ci étant suffisant pour répondre aux objectifs fixés.

Les résultats numériques ont été confrontés aux résultats expérimentaux par comparaison des cartes de déformations. Une bonne approximation des résultats théoriques avec les résultats expérimentaux a été constatée. Nous avons donc validé le modèle développé. L'analyse numérique a aussi permis de confirmer certains biais expérimentaux, notamment l'étanchéité imparfaite du joint de silicone utilisé pour limiter la diffusion hydrique longitudinale.

Nous avons ensuite utilisé ce modèle pour estimer et quantifier les contraintes induites par les chargements hydriques à proximité de l'interface dans les différentes configurations d'assemblages testés au cours du travail expérimental. Cette analyse a confirmé l'effet du positionnement des cernes par rapport au plan de collage :

- le positionnement convexe des cernes est le cas le plus défavorable. Le gonflement des lamelles de bois induit des contraintes importantes de traction horizontales dans le béton, pouvant provoquer sa fissuration, ainsi que des contraintes d'arrachement de l'interface qui peuvent traduire un décollement de l'interface ;
- le sens concave est satisfaisant avec des contraintes de traction verticales qui évoluent très peu et des contraintes d'arrachement négligeables le long de l'interface ;
- le sens incliné des cernes est une situation intermédiaire. Elle minimise les contraintes de traction horizontales dans le béton, mais ne permet pas de restreindre les contraintes de traction verticales qui peuvent traduire un décollement d'interface ;
- les contraintes de cisaillement estimées notamment aux bords des interfaces ne permettent pas de conclure, du fait de potentiels effets de bords mal appréhendés dans le modèle.

Le calcul numérique permet bien de visualiser des tendances de contraintes au niveau de l'interface et par comparaison des différents cas étudiés, de déterminer une géométrie de bois qui minimise le risque d'endommagement de l'assemblage. La détermination de critères de rupture est cependant délicate par le calcul, ces critères doivent être déterminés expérimentalement (contraintes d'arrachement).

Enfin, nous avons appliqué ce modèle à l'échelle d'une structure réelle. Le calcul est basé sur le pont mixte bois-béton proposé par le groupe de recherche du projet européen NR2C dont nous avons modélisé une section du plan XY parallèle au plan RT. Cette application numérique a montré des résultats semblables à ceux obtenus à l'échelle du laboratoire, même si les profils d'humidité dans l'élément « bois » sont différents :

- le sens convexe est le plus défavorable. Dans cette configuration, le gonflement des lamelles de bois induit des contraintes importantes de traction horizontales dans le béton, pouvant provoquer sa fissuration, ainsi que des contraintes d'arrachement au cœur de l'assemblage qui peuvent traduire un décollement de l'interface ;
- le sens concave montre des contraintes de tractions verticales qui évoluent très peu et des contraintes d'arrachement négligeables le long de l'interface, ce qui minimise le risque de rupture du béton et de l'interface ;
- des contraintes de cisaillement sont observées en zone proche des bords de l'interface, mais cet aspect nécessite d'être approfondi.

Dans le calcul, nous n'avons pas considéré les propriétés de fluage du bois et de vieillissement de la colle. En effet, les essais de laboratoire étant de courte durée, nous pouvons considérer que ceux-ci sont négligeables. De même, le comportement mécano-sorptif du bois n'a pas été pris en compte mais cette hypothèse simplificatrice va dans le sens de la sécurité pour le calcul des contraintes induites au niveau de l'interface bois-béton. .

En revanche, à l'échelle d'une structure réelle, il faudrait vérifier les effets (1) du fluage du bois pour des essais à long terme, (2) de la mécano-sorption dans le cas de sollicitations cycliques d'humidification-séchage, en prenant compte notamment des effets des hystérésis des courbes de sorption (avec effet sur le coefficient de diffusion, Merakeb, 2006), et (3) du vieillissement de la colle.

Conclusion générale

1. Synthèse des travaux réalisés

Les travaux menés pendant la thèse ont porté sur l'étude de la durabilité de l'assemblage bois-béton collé soumis à des sollicitations hydriques.

Du fait des propriétés hygroscopiques des matériaux constituant l'assemblage, des variations hydriques peuvent altérer la tenue de celui-ci. De fait, les sollicitations hydriques peuvent avoir un effet sur les propriétés d'adhérence de la colle mais aussi induire des dommages dans le bois, dans le béton, et au niveau de l'interface, notamment en raison des propriétés différenciées entre ces deux matériaux.

L'objectif principal de l'étude a été d'identifier les paramètres qui gouvernent les mécanismes d'endommagement pour proposer des solutions technologiques optimales et des conditions de mise en œuvre pour la tenue de l'assemblage.

Afin de répondre à cet objectif, nous avons mis en œuvre :

- ***des essais expérimentaux*** qui ont permis d'identifier (i) la résistance au cisaillement des assemblages collés bois-béton (chapitre 3) et (ii) les mécanismes d'endommagement au niveau de la connexion sur des assemblages soumis à des sollicitations hydriques (chapitre 4). Concernant les essais Push-Out, nous avons amélioré le protocole d'essais développé au laboratoire d'Autun et analysé la pertinence de cet essai avec la méthode de corrélation d'images numériques. Nous avons mis au point l'utilisation de la technique de corrélation d'images (DIC) pour l'exploitation d'essais de chargement hydrique appliquée à des assemblages collés bois-béton de taille décimétrique. Des procédures à deux échelles ont été mises en place (champs décimétrique et centimétrique au niveau de la connexion) et nous avons évalué les biais de la technique. Les essais sur petits corps d'épreuve soumis à une humidification, interprétés avec la technique DIC ont permis ainsi de localiser les zones d'endommagement de l'assemblage. Ces essais ont fait l'objet d'études complémentaires (IRM, gammadensimétrie) et de développements spécifiques (corps d'épreuves avec des vitres pour empêcher le transfert dans une direction) ;
- ***un modèle numérique*** par éléments finis pour simuler le comportement hydromécanique d'un assemblage bois-béton collé (chapitre 5). Ce modèle non linéaire prend en compte autant que possible la variabilité des propriétés hydriques du bois avec l'humidité, ainsi que le caractère orthotrope du bois. En confrontant les résultats numériques aux résultats expérimentaux par comparaison des cartes de déformations DIC et théoriques, nous avons pu valider le modèle (bois seul et assemblages). Une simulation à l'échelle d'une structure été réalisée afin de vérifier sa tenue sous humidification.

Les résultats principaux obtenus peuvent être résumés comme suit :

1. ***Sur les aspects expérimentaux :***

- les tests de cisaillement « Push-Out » ont montré (i) que le positionnement des cernes du bois perpendiculaires par rapport au plan de collage permet d'augmenter la rigidité de l'assemblage en termes de cisaillement et (ii) que la résine époxy pour laquelle nous avons observé des modes de rupture essentiellement cohésifs, est l'adhésif le mieux adapté. Par ailleurs, un vieillissement sous humidité relative variable de ces corps d'épreuve, a permis de constater une baisse de la résistance au cisaillement expliquée par la diminution des propriétés mécaniques du bois avec la prise d'humidité dans le cas de la résine époxy. L'ensemble de ces résultats confirme l'intérêt de la résine époxy pour la connexion collée bois-béton ;
- les essais sur des petits corps d'épreuve soumis à des sollicitations hydriques ont montré que :
 - la durabilité de l'assemblage peut être évaluée par deux types de tests : des essais d'imbibition et des essais sous humidité relative élevée. Ils permettent de mettre en évidence l'effet de la structure du bois, du type de béton et de la nature de l'adhésif sur les endommagements potentiels induits par les propriétés différenciées des matériaux, lorsque les assemblages sont soumis à des sollicitations hydriques,
 - les déformations hydriques du bois, de l'ordre du pourcent, peuvent induire des dommages localisés au niveau de l'interface. Nous avons pu observer sur les cartes de déformations mesurées par DIC deux mécanismes d'endommagement : (i) de la fissuration dans le béton, perpendiculaire au plan de collage, et (ii) du décollement de l'interface,
 - la géométrie du bois, et principalement le sens des cernes du bois a un effet considérable sur la réponse en déformation de l'assemblage. En particulier, lorsque les cernes du bois sont orientés dans le sens concave par rapport au plan de collage, nous n'observons pas d'endommagement, *i.e.* ni de fissuration du béton, ni de décollement de l'interface. Dans le cas où les cernes sont inclinés (cas de l'assemblage douglas-BFUP), le béton n'a pas fissuré mais un décollement a été observé. On rappelle que cette configuration se rapproche de la configuration favorable en termes de résistance en cisaillement longitudinal, où les cernes sont orientés perpendiculairement au plan de collage. Le collage dans le sens convexe est à éviter car il induit de la fissuration du béton et du décollement de l'interface bois-colle,
 - les essais réalisés ont confirmé le choix de la colle époxy comme présentant, pour le cas favorable (cerne concave) les meilleures caractéristiques de durabilité. Ils ont aussi montré que le BFUB permet de réduire les risques de fissuration, si l'orientation des cernes du bois n'a pas été optimisée par rapport aux risques d'endommagement ;

2. ***Sur les aspects numériques :***

- le modèle développé a été utilisé pour estimer et quantifier les contraintes induites par les chargements hydriques à proximité de l'interface dans les différentes configurations d'assemblage testés au cours du travail expérimental. Les propriétés hygroscopiques du bois ont été mesurées pour les deux espèces de bois considérées (coefficient de diffusion, courbes de sorption, déformations hydriques). Cette analyse a confirmé l'effet du positionnement des cernes par rapport au plan de collage :

- la fissuration dans le béton a été expliquée par les contraintes de traction dans le béton plus importantes dans le cas du sens convexe. Les mêmes tendances ont été obtenues pour les contraintes d'arrachement. Les risques d'endommagement peuvent être réduits avec des orientations du bois sens concave ou cernes inclinés,
 - les contraintes de cisaillement estimées notamment au niveau des bords libres ne permettent pas de conclure du fait de singularités mal appréhendées par le modèle ;
- Nous avons appliqué ce modèle à l'échelle d'une structure réelle. Le calcul est basé sur le pont mixte bois-béton proposé par le groupe de recherche du projet européen NR2C dont nous avons modélisé une section du plan XY parallèle au plan RT. Cette application numérique a montré des résultats semblables à ceux obtenus à l'échelle du laboratoire, même si les profils d'humidité dans l'élément « bois » sont différents :
- le sens convexe est le plus défavorable car le gonflement des lamelles de bois induit des contraintes importantes de traction horizontales dans le béton, pouvant provoquer sa fissuration, ainsi que des contraintes d'arrachement au cœur de l'assemblage qui peuvent traduire un décollement de l'interface. Les contraintes induites sont minimisées dans le cas du sens concave,
 - des contraintes de cisaillement sont observées en zone proche des bords de l'interface, mais cet aspect nécessite d'être approfondi.

L'ensemble de ces résultats a permis de répondre aux objectifs que l'on s'est fixés dans cette étude. Nous avons déterminé le paramètre prépondérant qui conduit à l'endommagement au niveau de l'interface de l'assemblage : les déformations hydriques du bois. Nous avons alors mis en évidence l'influence du sens des cernes du bois sur l'endommagement de l'assemblage, en d'autres termes, nous avons déterminé un sens privilégié des cernes du point de vue du chargement hydrique. Ainsi on préférera orienter le bois dans le sens concave des cernes, *i.e.* orienter le cœur du bois vers le bas pour limiter les dégradations liées aux variations volumiques de ce matériau.

Cependant pour optimiser la résistance au cisaillement du bois dans l'assemblage, il faut positionner les cernes perpendiculairement au plan de collage.

Ainsi, selon la structure considérée, il faudra conduire une étude approfondie pour évaluer les contraintes dans la section transversale puis dans la section longitudinale, en fonction de la géométrie des sections du bois. On pourra alors proposer la solution qui minimise les risques de dégradation lors de sollicitations hydriques.

2. Perspectives

Plusieurs études peuvent être proposées pour poursuivre ce travail :

1. Sur les aspects expérimentaux :

- en observant à une échelle plus fine les mécanismes d'adhésion entre le bois et la colle. Il peut être intéressant de réaliser des essais en faisant varier l'état de surface du bois pour améliorer l'adhésion de la colle dans le bois, et ainsi augmenter la résistance à l'arrachement ou au cisaillement de l'assemblage ;
- en déterminant des critères de rupture expérimentalement. Des essais mécaniques pour déterminer un critère de rupture en cisaillement dans les plans RT et TL du bois ainsi qu'un critère de rupture par arrachement de l'interface peuvent être développés. Les critères de rupture obtenus expérimentalement pourront être considérés dans la modélisation numérique du comportement hydromécanique de l'assemblage, et permettront de faire une interprétation plus fine des résultats numériques, en relation avec les endommagements observés expérimentalement lors des tests d'humidification ;
- en réalisant des essais de cisaillement, prenant en compte l'effet de vieillissement de l'assemblage (avec des chargements hydriques continus ou cycliques) afin d'évaluer les propriétés résiduelles d'adhérence de la colle au sein d'un assemblage bois-béton. Cet aspect a déjà été étudié via les essais Push-Out, mais les résultats expérimentaux n'ont pas permis de conclure quant à l'évolution des propriétés d'adhérence de l'assemblage. Il s'agit donc d'améliorer le protocole d'essais ;
- en réalisant des essais, à l'échelle du laboratoire, de chargements cycliques d'humidification séchage. L'analyse des essais par DIC permettra de localiser les endommagements potentiels liés au phénomène de retrait-gonflement empêché du bois et son comportement mécanosorptif.

2. Sur les aspects numériques :

- en réalisant une étude approfondie en affinant le maillage du comportement au bord de l'interface, comme précisé au chapitre 5. L'objectif de cette étude est d'interpréter les contraintes évaluées aux bords de l'interface, en particulier les contraintes de cisaillement et d'arrachement, afin notamment de mieux identifier les mécanismes de dégradation en lien avec les orientations des cernes ;
- en effectuant une étude paramétrique⁹ : (i) en faisant varier les modules, les coefficients de poisson du bois, les dilatations hydriques et les coefficients de diffusion, on peut suggérer une essence de bois favorable à la tenue de l'assemblage, et/ou (ii) en testant d'autres géométries d'assemblages (type rainurage), on peut proposer des solutions qui permettent de minimiser les contraintes aux niveaux des interfaces ;
- en réalisant une étude sur la tenue à long terme d'une structure, en prenant en compte dans les calculs, les propriétés de fluage des matériaux, de vieillissement de la colle, ainsi que le caractère

⁹ Cette étude paramétrique a été présentée lors de la soutenance. Les calculs réalisés sont présentés en annexe A4.

mécanosorptif du bois dans la structure, afin de pouvoir mieux estimer la durée de vie de la structure.

Bibliographie

- Adams, R. D., Comyn, J., & Waka, W. C. (1984). *Structural adhesive joints in engineering*. Chapman & Hall.
- AFGC. (2002). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*. Association Française de Génie-Civil.
- AFGC. (2004). *Conception des bétons pour une durée de vie des ouvrages, état de l'art*. Association Française de Génie-Civil, ouvrage collectif.
- Agoua, E., Zohoun, S., & Perré, P. (2001). A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water in wood in unsteady-state conditions : determination of the best fitting method by numerical simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 44, 3731-3744.
- Allais, L., Bornert, M., Bretheau, T., & Caldemaison, D. (1994). Experimental characterization of the local strain field in a heterogeneous elastoplastic material. *Acta. Metall. Mater*, 42 (11), 3865-3880.
- Almeida, G. (2006). *Influence de la structure du bois sur les propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées*. Université Laval.
- ASTM-D-1002. (1995). Standard Test Method for Apparent Shear Strength of single Lap Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loadin (Metal-to-Metal). *ASTM Standards*, 15 (06), 44-47.
- Bardet, S., & Gril, J. (2002). Modelling the transverse viscoelasticity of green wood using a combination of two parabolic elements. *C. R. Mecanique*, 330, 549-556.
- Baroghel-Bouny, V. (1994). *Caractérisation des pâtes de ciments et des bétons : méthodes, analyse, interprétations*. LCPC.
- Baroghel-Bouny, V., Mainguy, M., T, L., & Coussy, O. (1999). Characterisation and identification of equilibrium and transfert moisture properties for irdinary and high-performance cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 29, 1225-1238.
- Barral, L., Cano, J., & Lopez, J. (1999). Physical aging of epoxy/cycloalophatic amine resin. *Progress in Polymer Science*, 35, 403-411.
- Benboudjema, F. (2002). *Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires*. Université de Marne la Vallée.
- Benkechkache, G., & Houari, H. (2009). Comparaison des retraits et fluages des bétons autoplaçant et des bétons ordinaires vibrés. *Sciences et Technologie*, 30, 9-16.
- Benzarti, K., Chataigner, D., Quiertant, M., Marty, C., & Aubagnac, C. (2011). Accelerated ageing behavior of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays. *Constr. Build. Mater.*, 25 (2), 523-538.
- Benzarti, K., Pastor, M., Chaussadent, T., & Thaveau, M. (2003). Polymer adhesives in Civil Engineering : effect of environmental parameters on thermo-mechanical properties. *Repairing structures using composite Wraps*, 91-103.
- Bornert, M. (1996). *Morphologie microstructurale et comportement mécanique; caractérisations expérimentales, approches par bornes estimations autocohérentes généralisées*. École Nationale des Ponts et Chaussées.

- Bornert, M. (2003). *CorrelManuv user guide*.
- Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J., Fazzini, M., Grédiac, M., et al. (2008). *Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors : Methodology and Results*. Experimental Mechanics.
- Bou Said, E. (2003). *Contribution à la modélisation des effets différés du bois et du béton sous conditions climatiques variables : application aux structures mixtes bois-béton*. INSA Lyon.
- Bourgeois, M., Sohier, L., Créac'hcadec, R., & Cognard, J. (2009). Etude du comportement d'une colle dans un assemblage : comparaison de différents essais. *19e Congrès Français de Mécanique*. Marseille.
- Bramhall, G. (1995). Diffusion and the drying of wood. *Wood Science and Technology*, 29, 209-215.
- Branco, J., Cruz Paulo, J., & Piazza, M. (2009). Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections. *Construction and Building Materials*, 23, 400-410.
- Bruneaux, M. (2004). *Durabilité des assemblages collés, modélisation mécanique et physico-chimiques*. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Bush, X. (2000). *Dégradation thermique et fluage d'un adhésif structural époxyde*. École des Mines de Paris.
- Capretti, S., & Ceccotti, A. (1996). Service behaviour of timber-concrete composite beams: a 5-year monitoring and testing experience. *International Wood Engineering Conference*, 3, 443-449.
- Caré, S., & Foret, G. (2012). *Glissières de sécurité en bois, Études préliminaires*. Laboratoire Navier, École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Carputi, U., Noto, A., & Russo-Ermolli, E. (1981). Assemblages collés dans les structures composites acier-béton : Etude théorique et expérimentale. *Matériaux et Construction*, 14, 79.
- Carvalho, E., & Mantilla Carrasco, E. (2010). Influence of test specimen on experimental characterization of timber concrete composite joints. *Construction and Building Materials*, 24, 1313-1322.
- Ceccotti, A., Fragiaco, M., & Giordano, S. (2006). Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection. *Materials and structures*, 40, 15-25.
- Chajes, M., Thomson, T., & Farschman, C. (1995). Durability of concrete beams externally reinforced with composite fabrics. *Construction and Building Materials*, 9, 141-148.
- Chataigner, S. (2008). *Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites*. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Chataigner, S., & Flety, A. (2009). *Essais de caractérisation du collage bois-BFUP par Push-Out : Mise au point du protocole et premiers essais*. , 200. Rapport d'essais , Laboratoire départemental d'Autun.
- Chataigner, S., Rabasse, M., Benzarti, K., Quiertant, M., & Aubagnac, C. (2010). Durability of adhesively bonded composite reinforcements for concrete structures. *3rd Fib International Congress*.
- Chen, Y., Choong, E., & Wetzel, D. (1994). Optimum average diffusion coefficient : an objective index in description of wood drying data. *Wood Fiber Science*, 26, 412-420.
- Chong, E. (1965). Diffusion coefficients of softwood by steady state and theoretical methods. *Forest Product Journal*, 15, 21-27.
- CIMBéton. (2006). *Cahier des modules de conférence pour les écoles d'architecture : Des béton courants vers le béton aux nouvelles performances*.
- Cognard, J. (1994). *Le collage : État des connaissances et perspectives*. Technical Report, IEP.

- Cognard, J. (2000). *Science et technologie du collage*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Cognard, J. (2006). A study of non-linear behaviour of adhesively bonded composite assemblies. *Composites Structures*, 76, 34-46.
- Cognard, J., Créac'hcadec, R., Sohier, L., & Davies, P. (2008). Analysis of the non-linear behavior of adhesives in bonded assemblies. Comparison of TAST and ARCAN tests. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28, 393-404.
- Colmars, J. (2011). *Hygromécanique du matériau bois appliquée à la conservation du patrimoine culturel : étude sur la courbure des panneaux peints*. Université Montpellier 2.
- Comstock, G. (1963). Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption, desorption, and steady state data. *Forest Product Journal*, 96-103.
- Courard, L., & Bissonnette, B. (2004). Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparations : analyse des paramètres d'essai. *Materials and Structures*, 37, 342-350.
- Couvrat, P. (1992). *Le collage structural moderne*. Lavoisier.
- De Freitas Magalhães Gomes Rivallain, F. (2012). *Influence du revêtement sur le comportement en fatigue des dalles orthotropes : étude d'une solution en BFUP*. Université Paris Est.
- Dent, R. (1977). A multilayer theory for gas sorption, part 1 : sorption for a single gas. *Textile Research Journal*, 47, 145-152.
- Djolani, B. (1972). Hystérèse et effets de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5 °C, 21 °C, 35 °C, 50 °C. *Ann. Sci. forest*, 29 (4), 465-474.
- Doumalin, P. (2000). *Microextensométrie Locale par Corrélation d'Image Numérique, application aux études micromécaniques par microscopie électronique à balayage*. École polytechnique.
- Droin-Josserand, A., Taverdet, J., & Vergnaud, J. (1988). Modelling the adsorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. *Wood Science Technology*, 22, 299-310.
- Fazzini, M. (2009). *Développement de méthodes d'intégration des mesures de champs*. Université de Toulouse.
- Flach, M., & Frennette, C. (2000). Engineering solutions and connections. *World conference on Timber Engineering*. British Columbia.
- Fragiacome, M., & Ceccotti, A. (2006). Long-term behavior of timber-concrete composite beams. I: Finite element modeling and validation. *J. Struct. Eng.*, 132, 13-22.
- Fragiacome, M., Amadio, C., & Macorini, L. (2007). Short- and long term performance of the "Tecnaria" stud connector for timber-concrete composite beam. *Materials and Structures*, 40, 1013-1026.
- Frandsen, H., Damkilde, L., & Svensson, S. (2007). A revised multi-Fickian moisture transport model to describe non-Fickian effect in wood. *Holzforschung*, 61, 563-572.
- Frigione, M., Aiello, M., & Naddeo, C. (2006). Water effects on the bond strength concrete/concrete adhesive joints. *Construction and building materials*, 20, 957-970.
- Garcia Boivin, S. (2001). *Retrait au jeune âge du béton développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène*. LCPC.
- Gerhards, C. (1982). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood : an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber*, 14 (1), 4-36.

- Gonzalez, D. (2006). *Durabilité des assemblages collés du génie civil : effets du vieillissement hygrothermique aux échelles micro et macroscopiques*. Université de Clermont Ferrand 2.
- Guitard, D. (1985). *Mécanique du matériau bois et composites*. Toulouse: Cepadues-Editions.
- Guitard, D., & El Amri, F. (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annals of Forest Science*, 44 (3), 335-338.
- Gutkowski, R., Brown, K., Shigidi, A., & Natterer, J. (2004). Investigation of notched composite wood concrete connections. *Journal of Structure Engineering*, 130 (10), 1553-1561.
- Guyot, A., & Chataigner, S. (2009). *Etude l'essai Push-Out sur le collage bois-BFUP*. Rapport de stage, Laboratoire Départemental d'Autun.
- Hild, F., & Roux, S. (2006). Digital Image Correlation : from displacement measurement to identification of elastic properties. *Strain*, 42 (2), 69-80.
- Hoffmeyer, P. (1990). *Failure of wood as influenced by moisture and duration of load* . College of Environmental Sciences and Forestry. State University of New York.
- Holcim. (s.d.). *Béton fibré à ultra-hautes performance : produits et applications*. Suisse (S.A): Strength. Performance. Passion.
- Huet, C., & Navi, P. (1990). Multiparabolic Multitransmission Model for thermoviscoelastic Behavior of wood. *ASME*, 17-24.
- Hutchinson, J. (1995). Physical aging of polymers. *Progress in Polymer Science*, 20, 703-760.
- Johnson, R., & Anderson, D. (1993). *Designer's handbook to Eurocode 4 - Part 1 : Design of composite steel and concrete structures*. London.
- Jurkiewieza, B., & Hottierb, J. (2005). Static behaviour of a steel–concrete composite beam with an innovative horizontal connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 1286-1300.
- Jutila, A., & Salokangas, L. (2010). Wood-concretecomposite bridges-Finnish speciality in the nordic countries. *Internationnal Conference on Timber Bridges*, (pp. 383-392).
- Karbhari, V., & Zao, L. (1998). Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening. *Composite Structures*, 40, 293-304.
- Kassapoglou, C., & Adelman, J. (1991). Thick Adherend Specimen Evaluation for the Determination of the Adhesive Mechanical Properties. *23th International SAMPE Technical Conference*, 162-176.
- Kouchade, A. (2004). *Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire*. ENGREF.
- Krabbenhoft, K. (2003). *Moisture transport in Wood : a study of phisical-mathematical models and their numerical implementation*. Departement of Civil Engineering technical university of denmark.
- Krabbenhoft, K., & Damkilde, L. (2004). A model for non Fickian moisture transfert in wood. *Materials and Structures*, 37, 615-622.
- Le Roy, R. (1996). *Déformations instantanées et différées des bétons à hautes Performances*. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Lukaszewska, E., Johnsson, H., & Fragiaco, M. (2008). Performance of connections for prefabricated timber–concrete composite floors. *Materials and Structures*, 41, 1533-1550.
- Mario, O. (2007). *Étude du vieillissement des assemblages structuraux acier/aluminium : Influence de l'environnement sur le dimensionnement*. École des Mines de Paris.

- Martino, M. (2005). *System for the construction of mixed wood and concrete floors, and the components required to join the two materials*. Brevet d'invention EP 1582644A1, European Patent Application.
- Maurice, B., & Christophe, G. (2000). Composite decks of concrete glued to timber. *World Conference to Timber Engineering*.
- Merakeb, S. (2006). *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. Université de Limoges.
- Montero, C. (2011). *Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois*. Université Montpellier 2.
- Mouchot, N. (2002). *Étude expérimentale et modélisation des transports diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique des bois de hêtre et d'épicéa*. Université Nancy 1.
- Mouchot, N., Wehrer, A., Bucur, V., & Zoulalian, A. (2000). Détermination indirecte des coefficients de diffusion de la vapeur d'eau dans les directions tangentielle et radiale du bois de hêtre. *Ann. For. Sci.*, 57, 793–801.
- Moutee, M., Fafard, M., Fortin, Y., & Laghdir, A. (2005). Modeling the creep behavior of wood cantilever loaded at free end during drying. *Wood Fiber Science*, 37 (3), 521-534.
- Natterer, J. S. (2000). *Construction en bois*.
- Navi, P., & Heger, F. (2005). *Comportement thermo-hydrromécanique du bois*. Presse polytechnique universitaires romandes.
- Navi, P., Pittet, V., & Plummer, C. (2002). Transient moisture effects on wood creep. *Wood Science Technology*, 36, 447-462.
- Negi, A. (1999). Turbulence in the wood system with small and short stresses. *Wood and Science Technology*, 33, 209-214.
- Neville, A. (2000). *Propriété des bétons*. Eyrolles.
- Nguyen Trung, V. A. (2010). *Mutireforcement du bois lamellé-collé*. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Nguyen, T. (2011). *Endommagement localisé dans les roches tendres, expérimentation par mesure de champs*. Université Grenoble.
- Nogueira, P., Ramirez, C., & Torres, A. (2001). Effect of water sorption on the structure and mechanical properties of an epoxy resin system. *Journal of Applied Polymer Science*, 20, 71-80.
- Ormarsson, S., Dahlblom, O., & Petersson, H. (1998). A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation, Part 1 : Theory. *Wood Science and Technology*, 32, 325-334.
- Ormarsson, S., Dahlblom, O., & Petersson, H. (1999). A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation, Part 2 : Simulation of drying board. *Wood Science and Technology*, 33, 407-423.
- Ormarsson, S., Dahlblom, O., & Petersson, H. (2000). A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation, Part 3 : Influence of annual ring orientation. *Wood and Science Technology*, 34, 207-219.
- Ostergaard, L., Lange, D., & Altoubat, S. S. (2001). Tensile basic creep of early age concrete under constant load. *Cement and Concrete Research*, 31, 1895-1899.

- Peralta, P. (1995). Sorption of moisture by wood within a limited range of relative humidities. *Wood and Fiber Science*, 27 (1), 13-21.
- Pham, H. (2007). *Optimisation et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes*. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Pincus, G. (1970). Behavior of Wood concrete Composite Beams. *Journal of the Structural Division*, 96, 2265-2279.
- Popineau, S. (2005). *Durabilité en milieu humide d'assemblages structuraux collé type aluminium/composite*. École des Mines de Paris.
- Pottier, T. (2010). *Identification paramétrique par recalage de modèles éléments finis couplées à des mesures de champs cinématiques et thermiques*. Université de Savoie.
- Raftery, G., Harte, A., & Rodd, P. (2009). Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy gluelines. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 580-588.
- Robert, L., & Watrisse, B. (2009). Évaluation d'erreurs de mesure par corrélation d'images numériques : méthodologie et résultats. *Congrès Français de Mécanique*. Marseille.
- Sadi, A. (1990). *Contribution à l'étude du comportement mécanique d'une résine epoxy-amine au jeune âge : approche physico-chimique*. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Schäfers, M., & Seim, W. (2010). Developpement of adhesive bonded timber-UHPC composites - experimental and theoretical investigations. *World Conference on Timber Engineering*.
- Schaub, M. (1929). *Brevet d'invention-Liaison exempte de glissement entre armature en bois et béton dans les constructions en béton à armature en bois*. Brevet d'invention 667419, Brevet d'invention-Ministère du Commerce et de l'Industrielle.
- Skaar, C. (1988). *Wood Water relation*. (Berlin, Éd.) Springer Series in Wood Science.
- Skaar, C., & Babiak, M. (1982). A Model for Bound-Water Transport in Wood. *Wood science and technology*, 16, 123-138.
- Spasojevic, A. (2008). *Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design*. Lausanne, Switzerland: PhD EPFL.
- Spasojevic, A., Burdet, O., & Muttoni, A. (2008). *Applications structurales du Béton Fibré Ultra Haute Performance aux ponts*. École Polytechnique de Lausanne.
- Tazawa, E., Miyazawa, S., & Kasai, T. (1995). Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. *Cement and Concrete Research*, 25 (2), 288-292.
- Time, B. (1998). *Hygroscopic Moisture Transport in Wood*. Norwegian University of Science and Technology.
- Torrati, T., & Svensson, S. (2000). Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. *Wood Science Technology*, 34 (4), 317-326.
- United States Department of Agriculture. (1999). *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. Forest products laboratory.
- Vales, F. (2008). *Modes de déformation et d'endommagement de roches argileuses profondes sous sollicitations hydro-mécanique*. École Polytechnique.
- Vigneron, S. (2010). *Analyse thermomécanique multiechelle de la transformation de phase dans les alliages à mémoire de forme*. Université de Montpellier.
- Vokersen, O. (1938). Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15-41.

- Wadsö, L. (1993). *Studies of water vapor transport and sorption in wood*. Lund University.
- Wadso, L. (1994). Unsteady state water adsorption in wood : an experimental study. *Wood and Fiber Science*, 26 (1), 36-50.
- Wang, L., Héripré, E., El Outmani, S., Caldemaison, D., & Bornert, M. (2010). A simple expérimental procédure to quantify image noise in the context of strain measurements at the microscale using DIC ans SEM image. *ICEM14*.
- Watsö, L. (1994). Describing non-Fickian water-vapour sorption in wood. *Journal of Material Science*, 29, 2367-2372.
- Yang, D., Bornert, M., Gharbi, H., Valli, P., & Wang, L. (2010). Optimized optical setup for DIC in rock mechanics. *ICEM14*.
- Youssef, G., Rabasse, M., Flety, A., & Pisseloup, O. (2013). *OR 11R096 : Renforcements par matériaux composites et assemblages collés en génie civil, Essais Push-Out sur assemblages collés bois-BFUP*. DL Autun.
- Zhou, J., & Lucas, J. (1999). Hygrothermal effects of epoxy resins. Part II: variations of glass transition temperature. *Polymer*, 40, 5513-5522.
- Zillig, W. (2009). *Moisture transport in wood using a multiscale approach*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Zillig, W., Carmeliet, J., & Derome, D. (2009). Influence of the microstructure on the vapor transport in wood.
- Zohoun, S. (1998). *Détermination de la diffusivité massique dans le domaine hygroscopique du bois : comparaison des mesure en régime permanent et transitoire*. Institut National Polytechnique Lorraine.
- Zohoun, S., Agoua, E., Degan, G., & Perre, P. (2003). An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime. *Heat and Mass Transfert*, 39, 147-155.
- Zreiki, J. (2009). *Comportement au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages*. LMT Cachan.

ANNEXES

A1. IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE.....	223
A1.1. Caractéristiques du spectromètre imageur	223
A1.2. Mesure de la teneur en eau	223
A2. GAMMADENSIMETRIE.....	225
A2.1. Appareil et principe de la mesure	225
A2.2. Mesures de l'humidité, application au matériau bois	226
A3. CARTES DE DEFORMATIONS POUR LES ASSEMBLAGES BOIS-BETON SOUS SOLLICITATION HYDRIQUE	228
A3.1. Série 1 – Tests d'imbibition.....	228
A3.2. Série 2 – Chargement sous HR=97 % : cas avec mortier	230
A3.3. Série 3 – Chargement sous HR=97 % : cas avec BFUP	232
A4. APPLICATION NUMERIQUE : ÉTUDE PARAMETRIQUE	235
A4.1. Influence de la géométrie des cernes du bois par rapport au plan de collage	235
A4.2. Influence des modules du bois	238

A1. Imagerie par Résonance Magnétique

A1.1. Caractéristiques du spectromètre imageur

Les études ont été effectuées sur un spectromètre-imageur à 0,5 Tesla (fréquence de résonance de 20 MHz pour le proton) DBX 24/80 Bruker avec une antenne radiofréquence type cage d'oiseaux de 20 cm de diamètre interne et 20 cm de haut (Figure A1-1). La valeur maximale des gradients appliqués est de 50 mT/m dans les trois directions, et le temps de montée est de 500 ms. Avant chaque mesure, le réglage des antennes est effectué permettant de calibrer la fréquence propre de l'antenne (tuning) et d'optimiser son accord en impédance (matching).

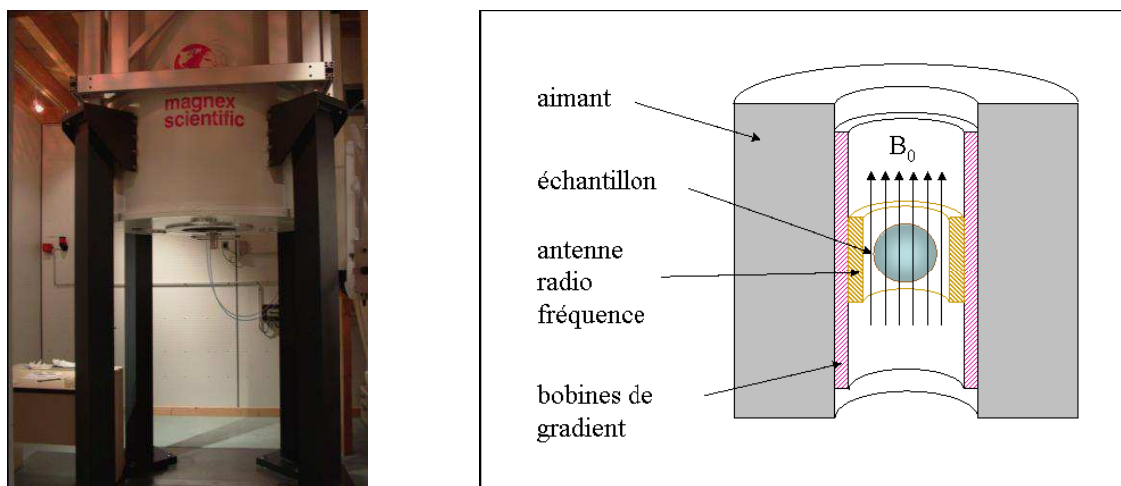


Figure A1-1 – Spectromètre IRM du laboratoire Navier.

A1.2. Mesure de la teneur en eau

Les images IRM ont été réalisées à l'aide de la séquence SPI. Des mesures complémentaires ont permis de vérifier que la séquence SPI permet dans le cas du bois d'imager l'eau libre et l'eau liée (contrairement à la séquence Echos de Spin qui ne permet d'imager que l'eau libre¹⁰).

¹⁰ L'eau libre/eau liée correspond à l'eau dans les cellules / eau absorbée au niveau des parois des cellules. La séquence d'Echos Spin ne permet pas de voir l'eau qui a un temps de relaxation inférieur à 5 ms, et qui se trouve dans les cellules, alors que la séquence SPI permet de voir l'eau qui a un temps de relaxation bien inférieur, et qui est absorbée au niveau des parois des cellules.

La séquence SPI permet un codage point par point dans une direction de l'espace. La séquence est de la forme : Grad on - θ - t_p - acq 1 pt- Grad off. La séquence est répétée N fois.

Le signal $S(z)$ suivant z à l'instant t mesuré est le suivant :

$$A1-1 \quad S(z) = \rho \cdot \exp\left(-\frac{t_p}{T_2^*}\right) * \left[\frac{1 - \exp\left(-\frac{TR}{T_1}\right)}{1 - \cos \theta \cdot \exp\left(-\frac{TR}{T_1}\right)} \right] * \sin \theta$$

Avec ρ : densité protonique, t_p : temps de détection, T_2^* : T_2 affecté par la perte de cohérence des spins due aux inhomogénéités de champ magnétique dans l'échantillon, TR : temps de répétition, θ : angle d'impulsion, $S(z)$: signal mesuré.

Les paramètres de mesures pour les images SPI réalisées sont : temps de répétition : $TR=3$ ms, detection time : $t_p=170$ us, angle d'impulsion : $\theta=10^\circ$, nombre de répétition : $N=12$. Les temps de relaxation ont été mesurés par ailleurs par la méthode de déconvolution (non présentée ici).

Les caractéristiques de l'essai sont : champ de vue : 15 cm, matrice de l'image : 108 pts x 108 pts, temps de mesure : 7 min. Les images ont une résolution d'environ 1,5 mm. Le signal est additionné sur toute l'épaisseur de l'échantillon, selon une direction de l'échantillon. Quelques résultats sont illustrés dans la figure A1-2.

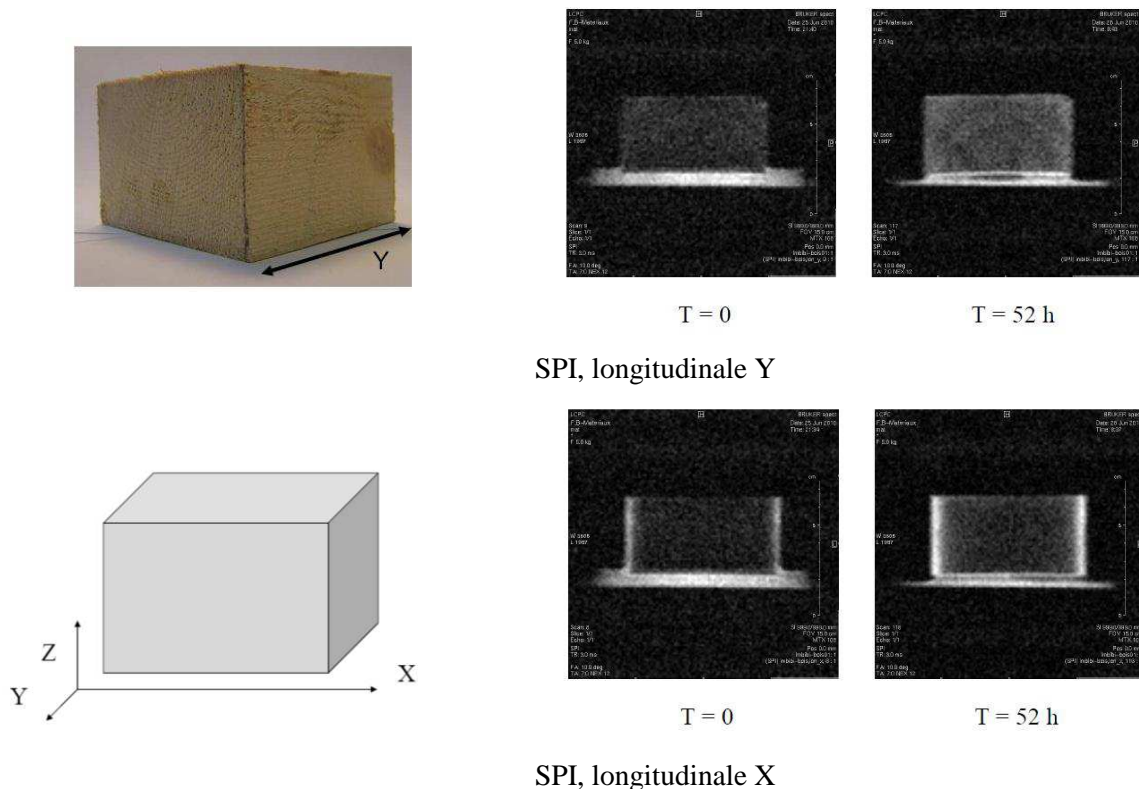


Figure A1-2 – Imbibition d'un cube de bois. Coupe longitudinale Y : plan d'observation ZX, signal additionné selon la direction Y. Coupe longitudinale X, plan d'observation, signal additionné selon la direction X.

A2. Gammadensimétrie

A2.1. Appareil et principe de la mesure

Le dispositif expérimental est présenté en figure A2-1. Il comprend la source radioactive (Cesium 137), un détecteur de rayons gamma (diamètre du rayon : 5 mm) et un plateau mobile qui autorise les déplacements verticaux qui permettent d'obtenir des profils selon la direction verticale.



Figure A2-1 : Banc gammadensimétrie.

Le principe de la gammadensimétrie repose sur l'absorption des rayons gamma issus d'une source radioactive. La source utilisée est une source de césium 137. L'atome de césium a une certaine probabilité de se désintégrer. L'échantillon de césium va donc être désintégré progressivement. Le flux N de photons émis suit une loi de décroissance radioactive :

$$\text{A2-1} \quad N_t = N_{t=0} \cdot \exp(-t/T)$$

Avec : $N_{t=0}$ désigne le flux de photons à l'instant $t=0$, N_t est le nombre de photons émis au temps t , T la demi-vie du matériau. Dans le cas du césium la demi-vie est de 30 ans.

Pendant l'expérience, le flux de photons gamma est considéré comme constant. Après avoir traversé le matériau, le flux N de photons transmis est mesuré en tenant compte de la correction de temps mort caractéristique de la chaîne de mesure. La loi (dite **de Lambert**) qui gouverne ce phénomène s'écrit pour un matériau composé de i phases :

$$\text{A2-2} \quad \ln(N_0/N) = \sum_i \mu_i x_i \rho_i$$

Avec μ_i le coefficient d'absorption de la phase i ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ_i la masse volumique de la phase i ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$), x_i l'épaisseur de matière de la phase i réellement traversée par le rayonnement (m), N le nombre de photons qui a traversé l'échantillon, N_0 le nombre de photons incidents.

On peut donc déduire de la mesure de la quantité de photons incidents et des photons reçus le produit $\mu_i x_i \rho_i$ qui nous donne des informations sur la composition de l'échantillon, sa densité et sa porosité.

A2.2. Mesures de l'humidité, application au matériau bois

Calcul de l'humidité

Pour les matériaux poreux, tels le bois, on a :

$$\text{A2-3} \quad \ln \frac{N_0}{N} = \mu_{\text{solide}} \rho_{\text{solide}} x_{\text{solide}} + \mu_{\text{eau}} \rho_{\text{eau}} x_{\text{eau}} + \mu_{\text{air}} \rho_{\text{air}} x_{\text{air}}$$

Avec μ_i , ρ_i et x_i : les coefficients d'absorption, masse volumique et épaisseur traversée de la phase i (solide, eau ou air).

En négligeant la masse volumique de l'air (ou le coefficient d'absorption de l'air), l'équation A2-3 devient :

$$\text{A2-4} \quad \ln \frac{N_0}{N} = \mu_{\text{solide}} \rho_{\text{solide}} x_{\text{solide}} + \mu_{\text{eau}} \rho_{\text{eau}} x_{\text{eau}}$$

On peut donc déduire des données de gammadensimétrie, la teneur en eau h selon :

$$\text{A2-5} \quad h = \frac{\rho_{\text{eau}} * x_{\text{eau}}}{\rho_{\text{solide}} * x_{\text{solide}}}$$

La détermination de la teneur en eau h se fera après détermination des différentes quantités définies dans l'équation A2-5.

Coefficient d'absorption et masses volumiques des phases solide et liquide.

Les données pour l'eau sont $\rho_{\text{eau}}=1000 \text{ Kg.m}^{-3}$ et $\mu_{\text{eau}}=0,0857 \text{ m}^2.\text{Kg}^{-1}$.

Selon les données bibliographiques, la masse volumique du bois anhydre, quelle que soit l'essence du bois, est : $\rho_{\text{solide}}=1520 \text{ Kg.m}^{-3}$

Le coefficient d'absorption μ pour le bois est estimé selon : $\mu_{\text{solide}} = \frac{1}{x_{\text{total}}} \sum \mu_i x_i = 0,0819 \text{ m}^2.\text{Kg}^{-1}$

Avec ρ_i et μ_i respectivement les masses volumiques et les coefficients d'absorption des différents constituants du bois. Le coefficient d'absorption du bois sec est déterminé à partir de la composition chimique des différents composants le constituant.

Fraction de phases solide x_{solide} et liquide x_{eau}

La fraction de bois anhydre x_{solide} est obtenue après étuvage à 103°C. La fraction de phase solide est donc donnée par :

$$\text{A2-6} \quad x_{\text{solide}} = \frac{\ln \frac{N_0}{N_{\text{sec}}}}{\mu_{\text{solide}} \rho_{\text{solide}}}$$

On considère que les échantillons, au cours du temps, ont la même fraction de phase solide x_{solide} . Sous cette hypothèse, la fraction de phase « eau » peut être obtenue à partir des données obtenues sur l'échantillon qui est soumis à un chargement hydrique selon :

$$\text{A2-7} \quad \left(\ln \frac{N_0}{N} \right) - \left(\ln \frac{N_0}{N} \right)_{\text{solide}} = \mu_{\text{eau}} \rho_{\text{eau}} x_{\text{eau}}$$

D'où pour la fraction de phase « eau » :

$$\text{A2-8} \quad x_{\text{eau}} = \frac{\left(\ln \frac{N_0}{N} \right) - \left(\ln \frac{N_0}{N} \right)_{\text{solide}}}{\mu_{\text{eau}} \rho_{\text{eau}}}$$

A3. Cartes de déformations pour les assemblages bois-béton sous sollicitation hydrique

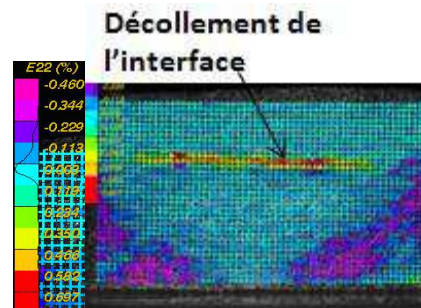
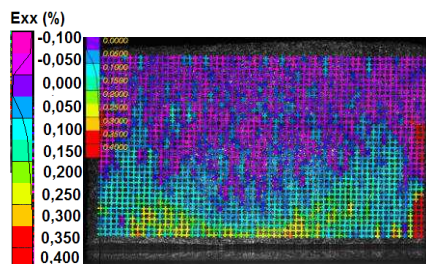
A3.1. Série 1 – Tests d’imbibition

Cas épicea sens convexe-mortier

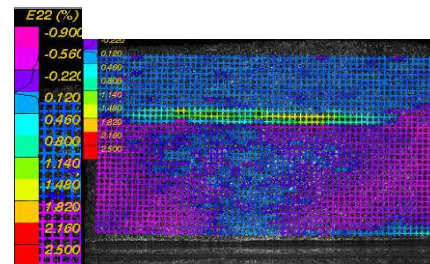
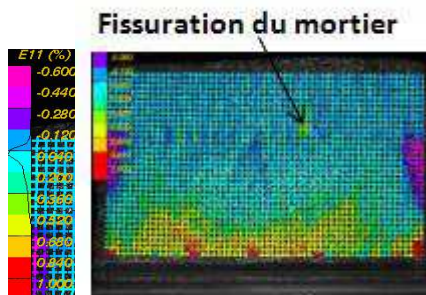
Figure 4-32a Composantes XX des déformations

Composantes YY des déformations

6 h



48 h



10 jours

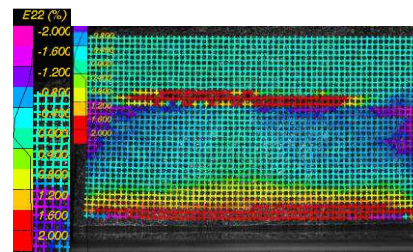
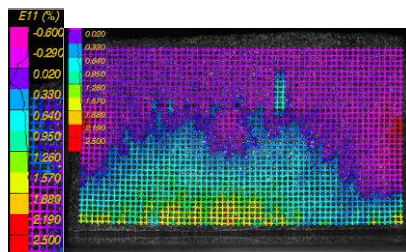


Figure A3-1 : Évolution des déformations d’un assemblage épicea sens convexe-mortier soumis à un test d’imbibition.

Cas épicea sens concave-mortier

Figure 4-32b Composantes XX des déformations

Composantes YY des déformations

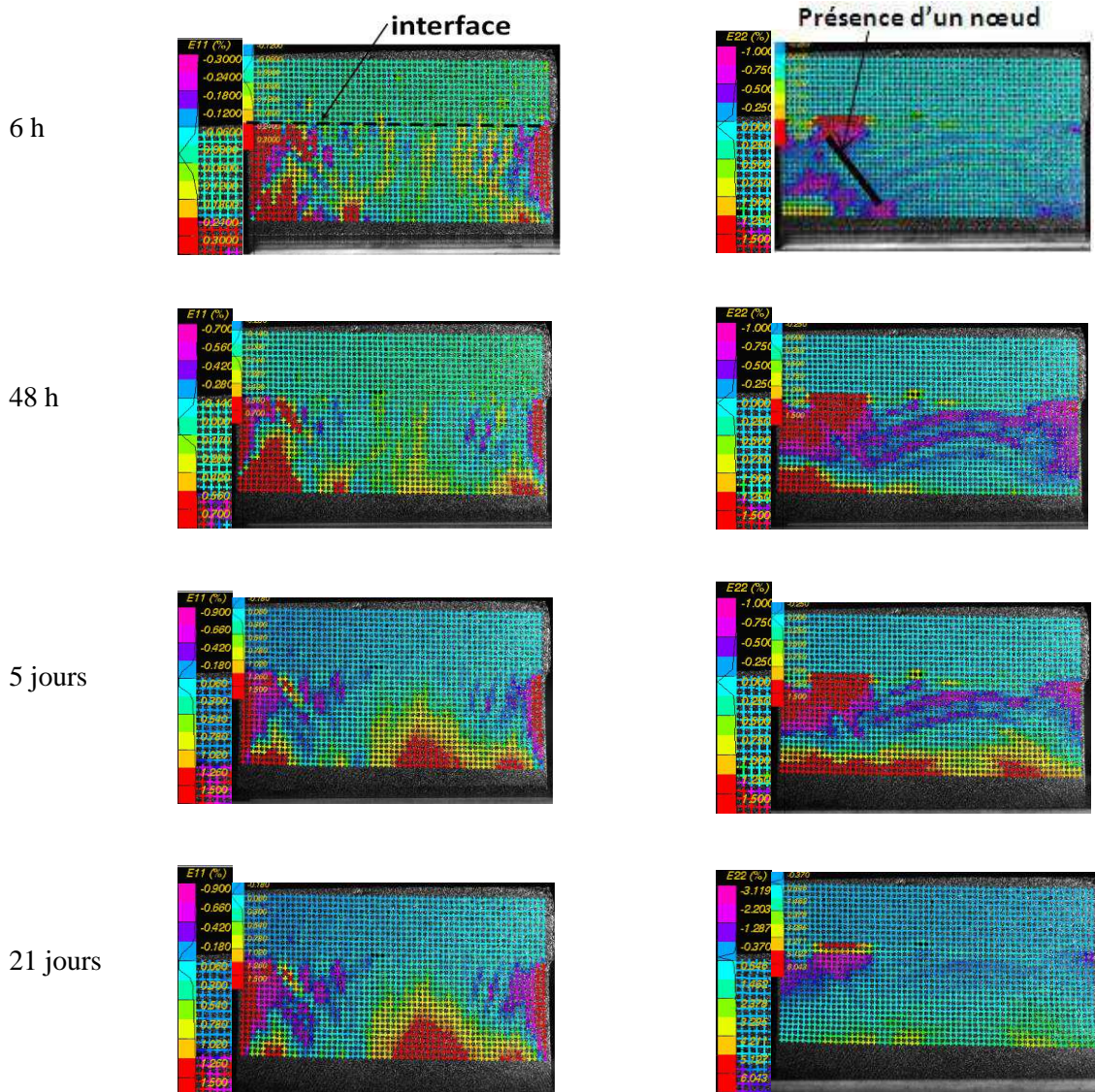


Figure A3-2 : Évolution des déformations d'un assemblage épicea-mortier dont le cœur du bois se trouve au niveau de la face inférieure, échantillon présenté par la figure 4-21, soumis à un test d'imbibition, composante XX des déformations à gauche et composante YY.

A3.2. Série 2 – Chargement sous HR=97 % : cas avec mortier

Cas épicea sens convexe-mortier

Figure 4-

39a

Composantes XX des déformations

Composantes YY des déformations

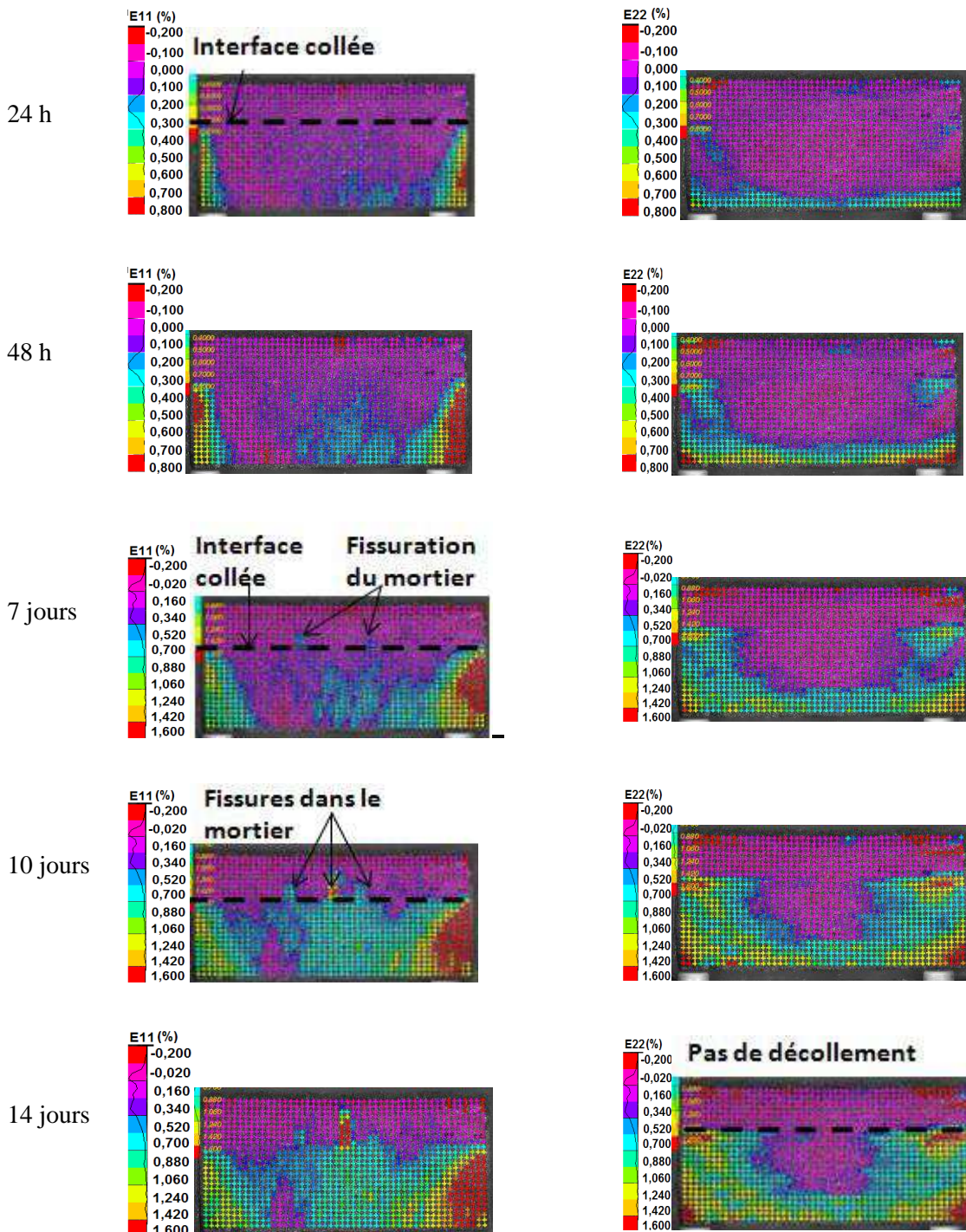


Figure A3-3 : Évolution des déformations d'un assemblage épicea-mortier dont le cœur du bois se trouve au niveau de l'interface collée, échantillon présenté sur la figure 4-22a, soumis à 97 % HR, composante XX des déformations à gauche et composante YY des déformations à droite à 24 h, 48 h, 7 jours, 10 jours et 14 jours après chargement hydrique.

Cas épicea sens concave-mortier

Figure

Composantes XX des déformations

Composantes YY des déformations

4-39b

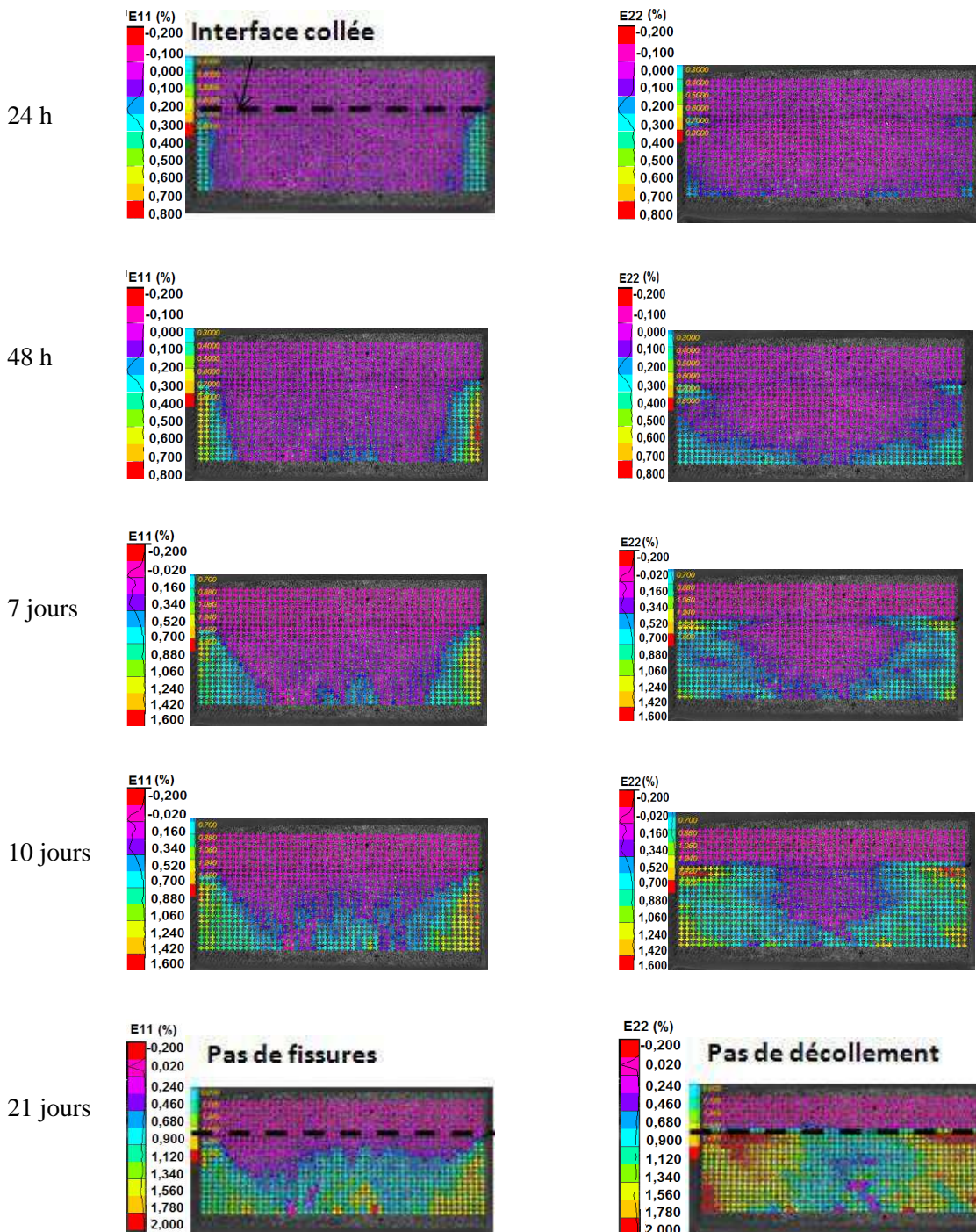


Figure A3-4 : Évolution des déformations d'un assemblage épicea-mortier dont le cœur du bois se trouve au niveau de la face inférieure, échantillon présenté sur la figure 4-22b soumis à 97 % HR, composante XX des déformations à gauche et composante YY des déformations à droite à 24 h, 48 h, 7 jours, 10 jours et 14 jours après chargement hydrique.

A3.3. Série 3 – Chargement sous HR=97 % : cas avec BFUP

Cas épicea sens convexe-BFUP

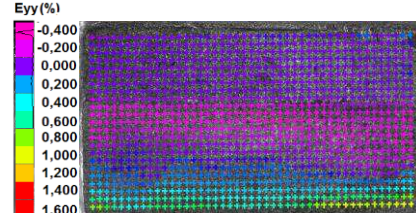
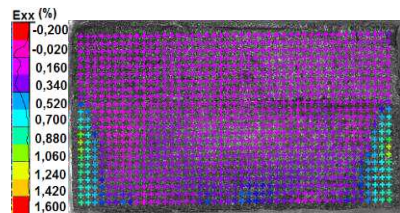
Figure 4-

32a

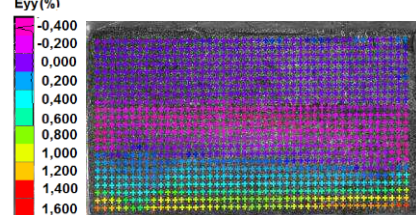
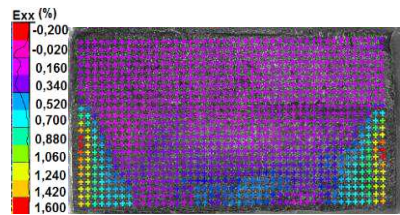
Composantes XX des déformations

Composantes YY des déformations

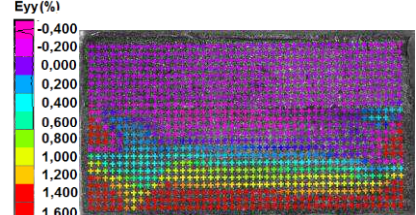
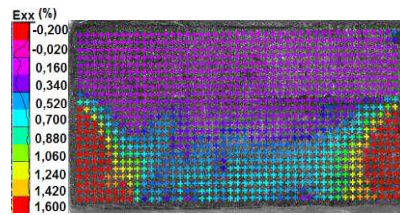
24 h



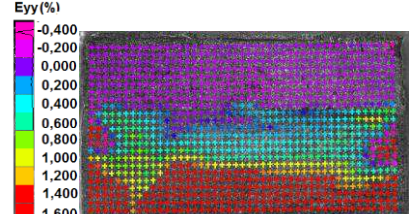
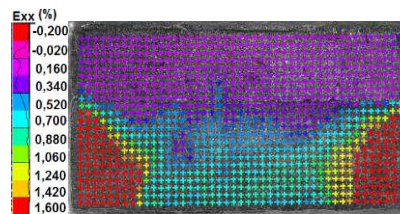
48 h



7 jours



12 jours



14 jours

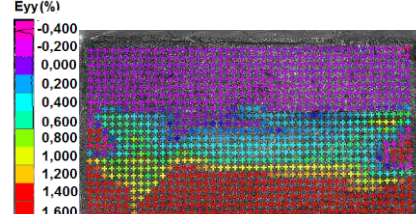
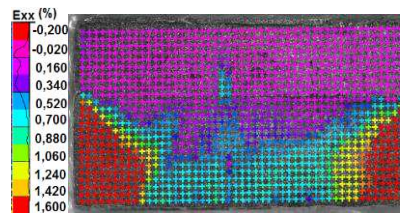


Figure A3-5: : Évolution des déformations d'un assemblage épicea-BFUHP dont le cœur du bois se trouve au niveau de l'interface collée, échantillon présenté sur la figure 4-23a soumis à 97 % HR, composante XX des déformations à gauche et composante YY des déformations à droite à 24 h, 48 h, 7 jours, 12 jours et 14 jours après chargement hydrique.

Cas épicea sens concave-BFUP

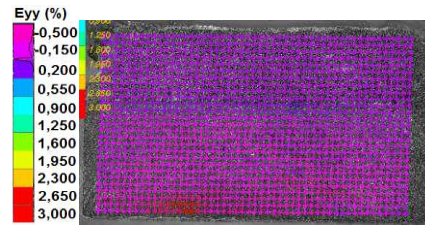
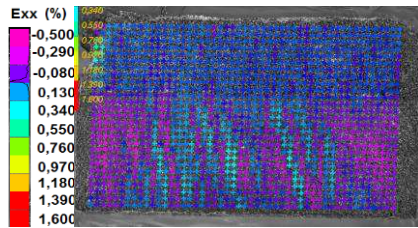
Figure

4-32b

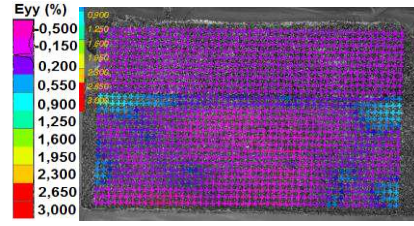
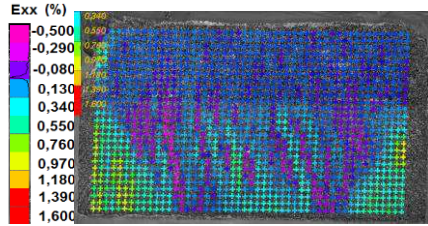
Composantes XX des déformations

Composantes YY des déformations

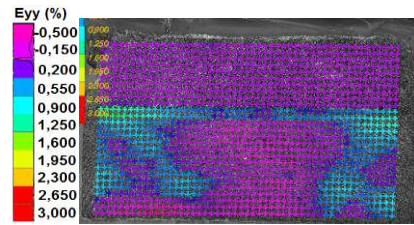
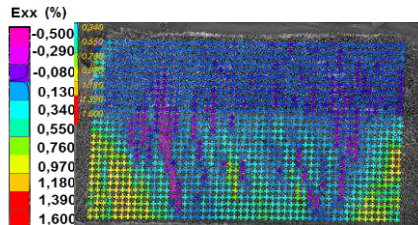
24 h



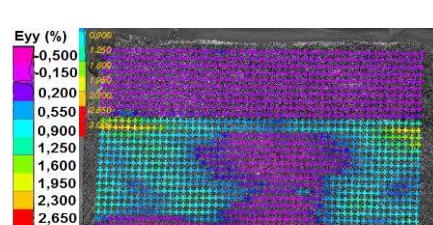
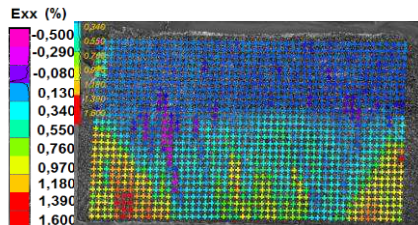
7 jours



10 jours



15 jours



21 jours

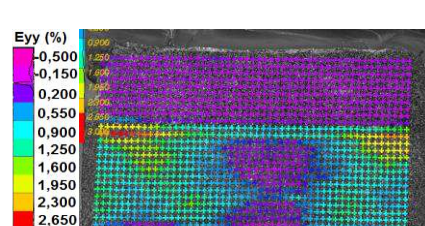
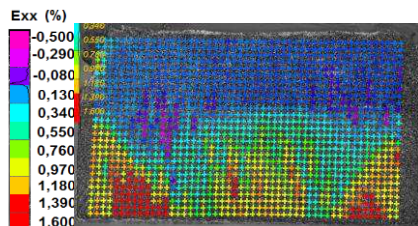


Figure A3-6: Évolution des déformations d'un assemblage épicea-BFUHP dont le cœur du bois se trouve au niveau de la face inférieure, échantillon présenté sur la figure 4-23b soumis à 97 % HR, composante XX des déformations à gauche et composante YY des déformations à droite à 24 h, 48 h, 7 jours, 10 jours, 15 jours et 21 jours après chargement hydrique.

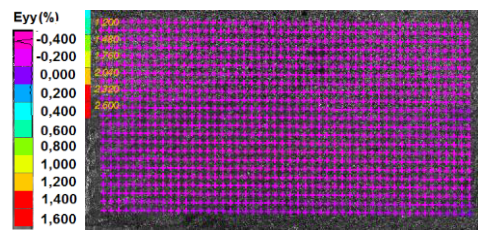
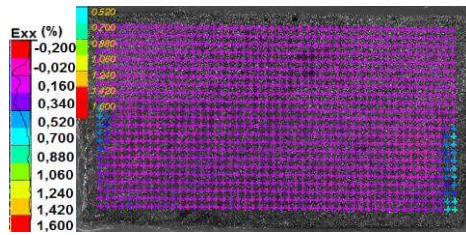
Cas douglas incliné-BFUP

Figure 4-39c

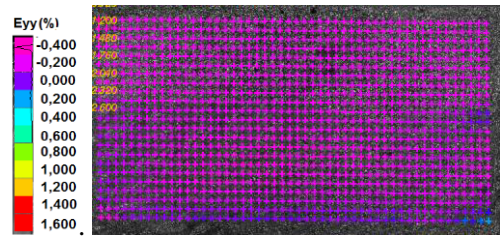
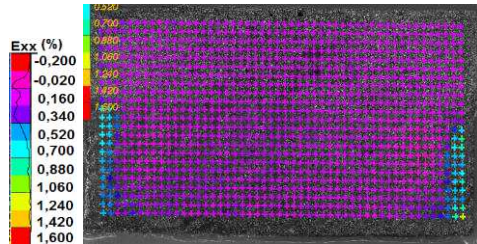
Composantes XX des déformations

Composantes YY des déformations

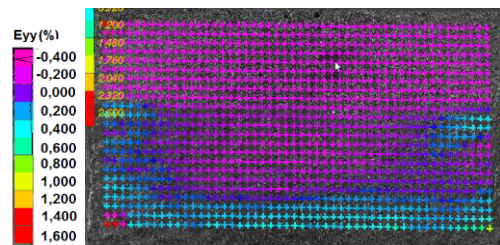
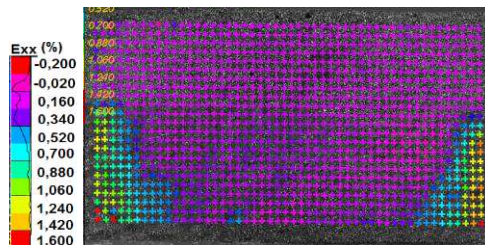
24h



48 h



7 jours



14 jours

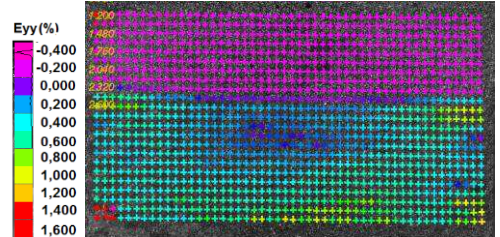
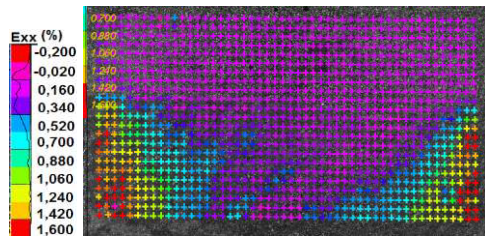


Figure A3-7: Évolution des déformations d'un assemblage épicea-BFUHP dont le cœur du bois se trouve au niveau de l'interface collée, échantillon présenté sur la figure 4-23a soumis à 97 % HR, composante XX des déformations à gauche et composante YY des déformations à droite à 24 h, 48 h, 7 jours, 12 jours et 14 jours après chargement hydrique.

A4. Application numérique : Étude paramétrique

Nous présentons dans cette annexe une étude paramétrique appliquée à la structure NR2C (voir chapitre 5). Le calcul reprend les mêmes hypothèses ainsi que les mêmes conditions de chargement que celles présentées au chapitre 5 (§5.4). Nous avons choisi d'analyser les effets des propriétés du bois sur les contraintes induites au niveau de l'interface. On fera varier le sens des cernes et les modules d'élasticité du bois.

L'évaluation des contraintes est réalisée en zone proche de l'interface dans le bois ou dans le béton avec la même démarche que celle employée au §5.4 5 (Figure A4-1).

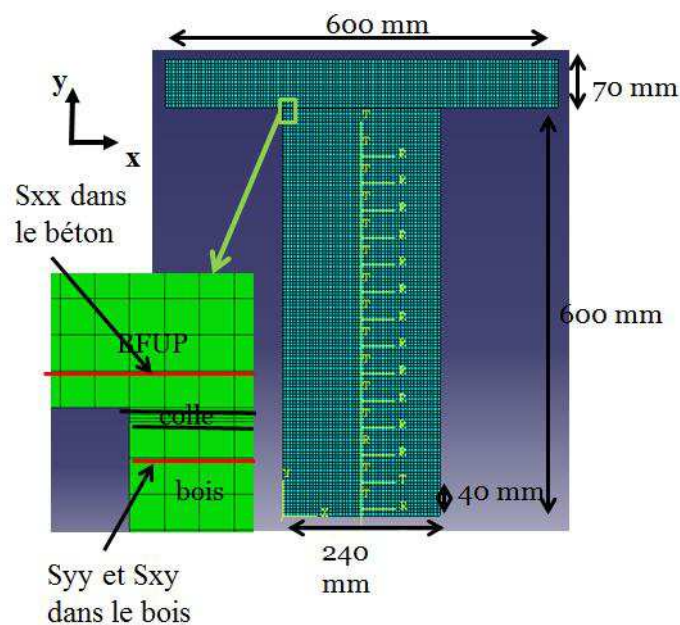


Figure A4-1 : Géométrie d'une coupe de la poutre NR2C, zone d'analyse des contraintes S_{xx} , S_{yy} et S_{xy} .

A4.1. Influence de la géométrie des cernes du bois par rapport au plan de collage

L'étude de l'influence du sens des cernes sur le comportement au niveau de l'interface de la structure NR2C a déjà été réalisée en partie au chapitre 5.

Nous avons repris ici les deux configurations décrites au chapitre 5 (avec toutes les lamelles de bois dans le sens convexe et dans le sens concave) et avons comparé les résultats avec une troisième configuration pour laquelle les cernes de la lamelle supérieure sont perpendiculaires au plan de collage. On rappelle que cette configuration a donné de meilleurs résultats en termes de résistance en cisaillement (chapitre 3) (Figure A4-3).

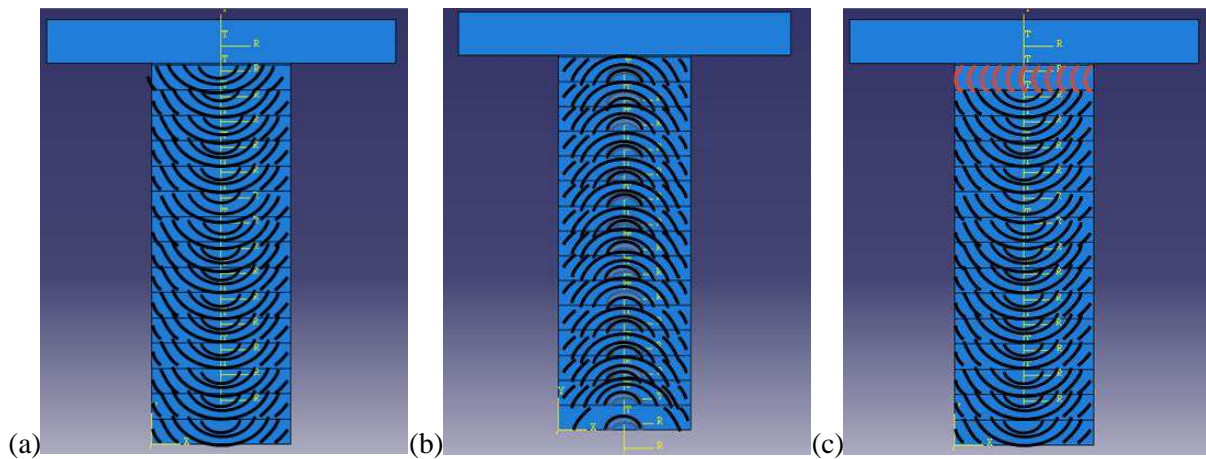


Figure A4-3 : Schématisation des trois configurations étudiées (a) sens convexe et (b) sens concave (c) sens perpendiculaire.

L'analyse des contraintes en zone proche de l'interface après 90 jours de chargement sous HR=97 % (Figure A4-4) montre que :

- la configuration pour laquelle les cernes de la lamelle de bois accolée au béton sont perpendiculaires au plan de collage ne permet pas de diminuer les contraintes de traction horizontale (S_{xx}) induite dans le béton par le gonflement empêché du bois par rapport au cas convexe. Celles-ci sont légèrement plus importantes que dans le cas où les cernes sont orientés dans le sens convexe ;
- les contraintes S_{yy} montrent que les risques de décollement par arrachement sont légèrement diminués lorsque les cernes de la lamelle supérieure sont perpendiculaires au plan de collage par rapport au cas où les cernes sont convexes (avec un pic de contrainte positive au cœur de l'interface présent pour les deux cas) ;
- le sens des cernes ne semble pas avoir un effet sur le risque de cisaillement (S_{xy}) le long de l'interface. Les contraintes S_{xy} sont très faibles au cœur de l'interface ;
- le cas pour lequel les cernes sont orientés dans le sens concave reste le plus avantageux en termes de tenue sous humidification.

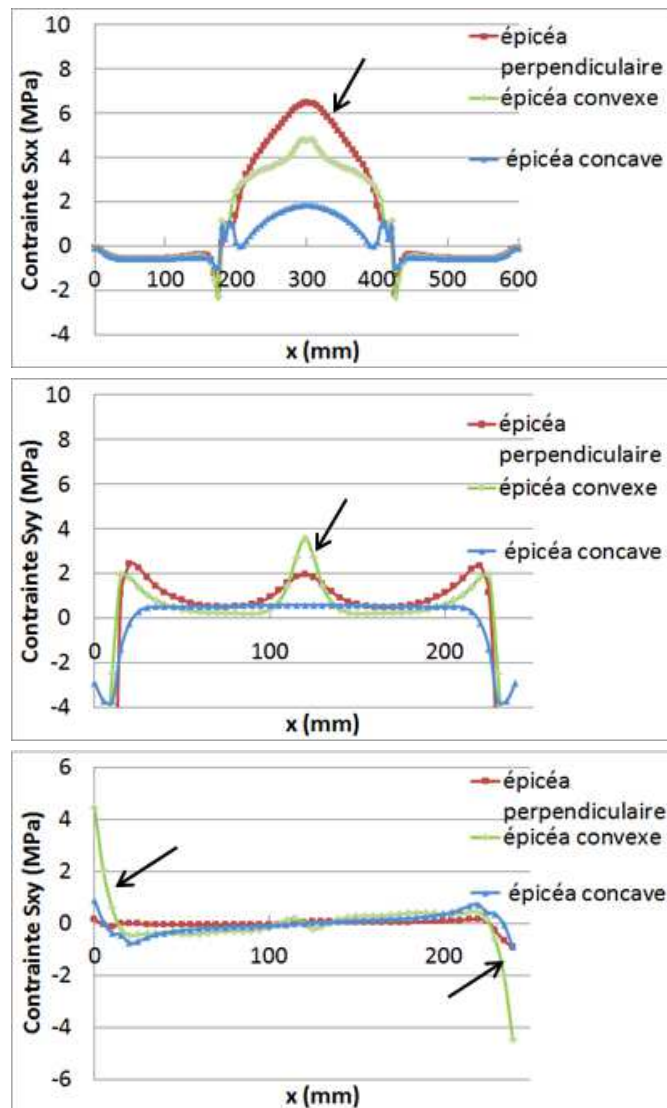


Figure A4-5 : Profil de contraintes (a) S_{xx} induites dans le béton proche de l'interface, (b) S_{yy} dans le bois et (c) S_{xy} dans le bois après 90 jours de chargement hydrique.

Le cas qui apparaît le plus favorable ici est le cas où les lamelles sont orientées dans le sens concave des cernes. Les configurations simulées sont des cas idéaux non réalistes. Les lamelles contenues dans un bois lamellé-collé ne sont jamais positionnées toutes dans le même sens. Il serait intéressant de vérifier l'effet du sens des lamelles intermédiaires sur les contraintes induites au niveau de l'interface.

A4.2. Influence des modules du bois

Pour étudier l'influence des modules du bois, deux bois avec des modules d'élasticité différents ont été considérés : l'épicéa et le chêne (bois plus rigide).

Tableau A4-1 : Modules d'élasticité et coefficients de poisson de l'épicéa et du chêne (Wood Handbook, 1999).

	E_R (MPa)	E_T (MPa)	E_L (MPa)	μ_{RT}	μ_{RL}	μ_{TL}	G_{RT} (MPa)	G_{RL} (MPa)	G_{TL} (MPa)
Épicéa	772	425	9900	0,435	0,04	0,025	29,7	633,6	603,9
Chêne Rouge	2417	1287	15800	0,58	0,033	0,064	439	1397	1271

L'analyse des contraintes (Figure A4-6) montre que les risques d'endommagement sous humidification augmentent avec la rigidité du bois (avec des contraintes S_{xx} , S_{yy} et S_{xy} au niveau de l'interface toujours plus importantes pour le chêne que pour l'épicéa).

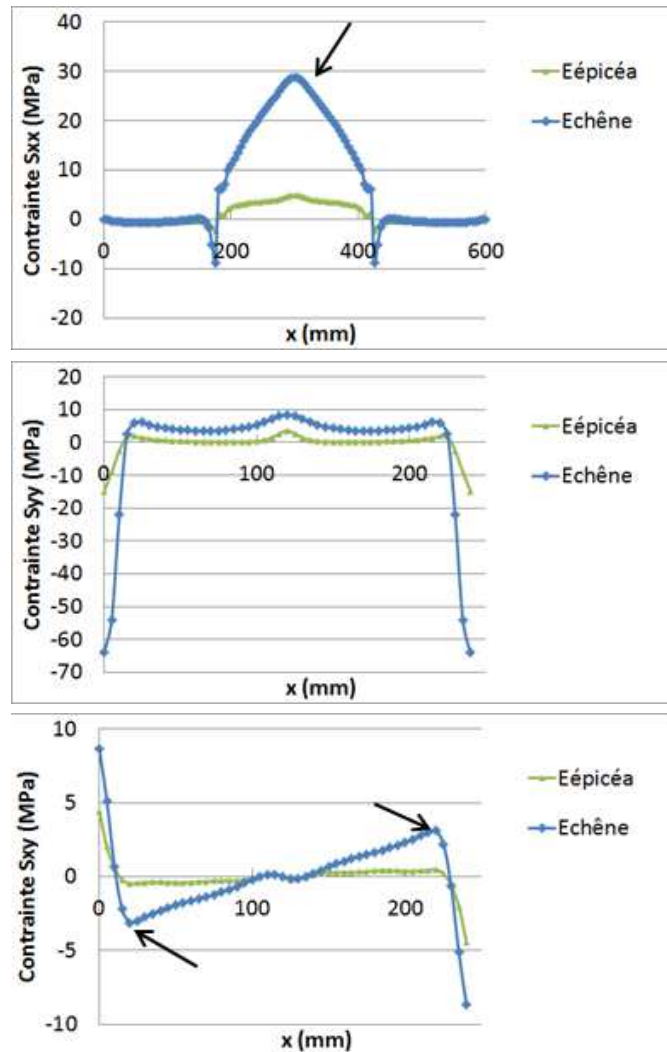


Figure A4-6 : Profil de contraintes (a) S_{xx} induites dans le béton proche de l'interface, (b) S_{yy} dans le bois et (c) S_{xy} dans le bois après 90 jours de chargement hydrique.

En conclusion, l'étude paramétrique présentée dans cette annexe montre qu'il est possible d'optimiser la tenue sous humidité de l'assemblage collé en choisissant un bois moins rigide, et en orientant les cernes des lamelles de bois autant que possible (notamment la lamelle accolée au béton) dans le sens concave par rapport au plan de collage.

D'autres paramètres peuvent être pris en compte afin de compléter l'étude. L'analyse de l'influence de la rigidité de la colle et du matériau cimentaire permettraient d'approfondir ce travail.

Table des Figures

Figure 1-1: (a) Photos Pont sur la Dore, (b) Pont de Merle (http://www.cete-est.developpement-durable.gouv.fr).....	12
Figure 1-2 : (a) Passerelles de Doubs (http://www.saut-du-doubs.biz), (b) Passerelle d'Ajoux (http://www.ardeche.fr).....	13
Figure 1-3 : Passerelle mixte bois-acier de La Rochelle en Ardenne (http://www.houtinfo Bois.be).....	13
Figure 1-4 : Pont "des Fayettees" dont la mixité du tablier est assurée par le système de connexion Bertsche (Flach M., 2000).....	14
Figure 1-5 : Pont la "Resgia" en Suisse (http://fr.structurae.de).....	14
Figure 1-6 : Dalle mixte bois-béton développée par le groupe CBS-CBT (D-Dalle). Portée de la poutre : 11 m à 18 m (http://www.cbs-cbt.com).....	15
Figure 1-7 : Exemples de connecteurs par entailles : brevet d'invention de Schaub (Schaub, 1929) et Martino (Martino, 2005).....	15
Figure 1-8 : (a) Passerelle mixte acier-béton de Kassel (Spasojevic, Burdet, & Muttoni, 2008), (b) prototype de dalle de pont Bois/BUHP/Carbone-époxy (Pham, 2007).....	16
Figure 1-9 : Représentation schématique d'un bois, avec les 3 sections orthogonales et structure anatomique d'un résineux (mecaweb.free.fr).....	18
Figure 1-10 : Schématisation d'une paroi cellulaire cellule longitudinale (trachéide) (Almeida, 2006).....	19
Figure 1-11 : Représentations schématiques de l'état de l'eau dans le bois, (a) au-dessus du PFS, (b) au PFS, (c) en dessous du PFS (Navi & Heger, 2005).....	20
Figure 1-12 : Isotherme de sorption d'un bois de chêne rouge, obtenue pour l'adsorption et la désorption à T=30°C (Peralta, 1995).....	21
Figure 1-13 : Isothermes de sorption d'un bois de hêtre à quatre différentes températures (Almeida, 2006).....	21
Figure 1-14 : Isothermes de sorption du douglas sous contraintes mécaniques homogènes (Merakeb, 2006).....	22
Figure 1-15 : (a) Retrait dans le bois au cours du séchage http://www.avbois.com et (b) accroissement du volume en fonction de la teneur en eau (Merakeb, 2006).....	24
Figure 1-16 : Variation du coefficient de dilatation longitudinale sur une section transversale du bois d'apicéa (Ormarsson, Dahlblom, & Petersson, 1999).....	25
Figure 1-17 : Variation du module élastique longitudinal sur une section transversale du bois d'apicéa (Ormarsson, Dahlblom, & Petersson, 1999).....	26
Figure 1-18 : Variation du module d'Young longitudinal (a) et de la résistance en traction (b) et en compression (c) en fonction du taux d'humidité dans le bois (Gerhards, 1982).....	28
Figure 1-19 : Essai de fluage en flexion sur des éprouvettes soumises à humidité constante (11 %) (à gauche) et variable (à droite) (Hoffmeyer, 1990).....	30
Figure 1-20 : Photo d'un béton, échelle microscopique.....	31
Figure 1-21 : (a) Comportement en compression et (b) en traction du BFUP (UHPFRC) en comparaison avec le béton ordinaire (OC) et le BHP (HSC) (Spasojevic A., 2008).....	33

Figure 1-22 : Effet du rapport E/C (a) sur le retrait endogène d'une pâte de ciment (Tazawa, Miyazawa, & Kasai, 1995) et (b) de dessiccation d'une pâte de ciment (Benboudjema, 2002).....	34
Figure 1-23 : (a) Effet d'E/C sur le fluage propre (Benboudjema, 2002) (b) comparaison du fluage propre et du fluage de dessiccation mesurés sur des pâtes de ciment.....	35
Figure 1-24 : Contraintes de traction moyennes en fonction des déformations sur des éprouvettes de colles époxy non vieilles et vieilles en milieu humide à HR=95 % et T= 40°C (Chataigner, Rabasse, Benzarti, Quiertant, & Aubagnac, 2010).	41
Figure 1-25 : Schématisation des types de rupture après essais mécaniques (Chataigner S. , 2008).....	42
Figure 1-26 : Les principaux modes de sollicitation, de gauche à droite : (a) traction bout-à-bout ; (b) pelage ; (c) torsion-cisaillement ; (d) cisaillement direct à simple recouvrement ; (e) cisaillement direct à double recouvrement (Adams, Comyn, & Waka, 1984).	43
Figure 1-27 : Dispositif des essais (a) TAST (Kassapoglou & Adelman, 1991) (b) et ARCAN (Cognard J. , 2006).....	44
Figure 1-28: Dispositif des essais de cisaillement à simple recouvrement : (a) traction-cisaillement (b) compression-cisaillement.	45
Figure 1-29 : Essai de cisaillement compression de joint à simple recouvrement (Lukaszewska, Johnsson, & Fragiaco, 2008).	46
Figure 1-30 : Éprouvettes Push-Out testées dans Carvalho et al. (Carvalho & Mantilla Carrasco, 2010)..	46
Figure 1-31 : Corps d'épreuve testé pendant l'essai à long terme (Ceccotti, Massimo, & Giordano, 2006).	48
Figure 2-1 : Photos du bois lamellé-collé d'épicéa (a) et de douglas (b).	54
Figure 2-2 : Photos d'éléments de bois testés (épicéa à gauche, douglas à droite).	57
Figure 2-3 : Stockage des échantillons sous humidité relative de l'air contrôlée par des solutions salines dans des dessiccateurs.	57
Figure 2-4 : Isotherme de sorption de l'épicéa à T=20 °C (les courbes continues sont des valeurs interpolées à partir des points expérimentaux).	58
Figure 2-5 : Isothermes de sorption du douglas à T=20 °C (les courbes continues sont des valeurs interpolées à partir des points expérimentaux).	58
Figure 2-6 : Exemple d'un cube d'épicéa préparé pour l'essai de diffusion dans la direction L.....	60
Figure 2-7 : Suivi de la teneur en eau en fonction du temps dans la plage d'HR [55 % ; 81 %] dans les directions r , t , et l (cas de l'épicéa).	61
Figure 2-8 : Courbes représentant le taux d'humidité moyen dans le bois (a) initialement à l'équilibre à HR=55 % soumis à HR=81 %, (b) initialement à l'équilibre à HR=81 % soumis à HR=97 %, obtenues expérimentalement (traits pleins) et par le calcul (pointillés) pour le cas de l'épicéa. Les valeurs de $P_{sat}.D/\rho$ indiquées sur les graphes sont exprimées en $m^2.s^{-1}$	63
Figure 2-9 : Courbes représentant le taux d'humidité moyen dans le bois (a) initialement à l'équilibre à HR=55 % soumis à HR=81 %, (b) initialement à l'équilibre à HR=81 % soumis à HR=97 %, obtenues expérimentalement (traits pleins) et par le calcul (pointillés) pour le cas du douglas. Les valeurs de $P_{sat}.D/\rho$ indiquées sur les graphes sont exprimées en $m^2.s^{-1}$	64
Figure 2-10 : Courbe représentant la dilatation hydrique mesurée expérimentalement pour le bois d'épicéa.	65
Figure 2-11 : Courbe représentant la dilatation hydrique mesurée expérimentalement pour le douglas.	65

Figure 2-12 : Comportement en traction des trois colles utilisées avant et après vieillissement (a) Époxy sikadur30, (b) Acrylique Modifiée (AM) et Polyuréthane (PU).	67
Figure 2-13 : Principe de l'essai Push-Out.	70
Figure 2-14 : Exemples d'échantillons testés hydriquement (a) échantillon de bois seul, (b) assemblage bois-mortier collé via l'Époxy Sika 32LP.	71
Figure 2-15 : a) Grille sur laquelle est déterminé le champ de déplacement. b) Suivi du niveau de gris. en un point de la grille.	77
Figure 2-16 : Schémas d'intégration (Vales, 2008) en un point de la grille.	79
Figure 2-17 : Image de référence (a) et image déformée (b) par une dilatation de 1 pixel environ.	83
Figure 2-18 : Carte de déplacements, dilatation de l'éprouvette.	83
Figure 2-19 : Cartographie des déformations, (a) déformations équivalentes au sens de Von Mises E_{eq} , (b) dans la direction x, E_{11} ou ϵ_{xx} , (c) dans la direction y, E_{22} ou ϵ_{yy} , lors d'une dilatation d'environ 1 pixel.	84
Figure 2-20 : Détermination des erreurs systématiques (à gauche) et aléatoires (à droite) pour le cas présenté en exemple pour des valeurs fractionnaires de pixel.	84
Figure 2-21 : Essais Push-Out pour analyse d'images.	86
Figure 2-22 : Montage essais de corrélation d'images pour les tests de chargement sous HR=97 %.	86
Figure 2-23 : Champs balayés au niveau de l'interface grâce au programme de pilotage de la caméra.	87
Figure 3-1 : (a) Longueur d'ancrage élastique d'O. Volkersen (Volkersen 1938) en fonction de la raideur de la colle (colle époxy) et du facteur d'efficacité Ksi. (b) schéma des éprouvettes Push-Out.	91
Figure 3-2 : Schéma de l'éprouvette Push-Out, et profils de cisaillement le long du joint de colle obtenus par la théorie élastique d'O. Volkersen pour quatre adhésifs ayant des modules élastiques différents et pour la longueur de collage de 180 mm.	92
Figure 3-3 : Section de la poutre mixte étudiée b) Schéma du chargement.	92
Figure 3-4 : Déformée de la moitié de la poutre à partir de la mi-travée en fonction du module de l'adhésif utilisé.	93
Figure 3-5 : (a) Photo d'une éprouvette Push-Out instrumentée (b) photo du positionnement de l'éprouvette sous la presse avec présence des cales.	94
Figure 3-6 : Fabrication des échantillons Push-Out - série préliminaire (série 0, (Chataignier 2009)).	95
Figure 3-7 : Faciès de rupture des échantillons avec primaire (échantillons P1, P2, P3).	96
Figure 3-8 : Faciès de rupture des échantillons sans primaire (échantillons SP1, SP2, SP3).	97
Figure 3-9 : Déplacements au niveau du joint de colle (échantillons SP2 et P2).	97
Figure 3-10 : (a) Photo du dispositif de maintien, (b) photo de la mise en place du serre-joint.	99
Figure 3-11 : Enregistrement de la température et de l'humidité relative en salle « piscine » entre fin février et juillet 2011.	99
Figure 3-12 : Photos des éprouvettes E1, E2, et E3 (Sikadur 30) après rupture.	102
Figure 3-13 : Photos des éprouvettes 330-1, 330-2, et 330-3 (Sikadur 330) après rupture.	102
Figure 3-14 : Photos des éprouvettes PU1, PU2, et PU3 (polyuréthane) après rupture.	102
Figure 3-15 : Photos des éprouvettes AM1, AM2, et AM3 (acrylique modifiée) après rupture.	102
Figure 3-16 : Teneur en eau moyenne des échantillons E4, E5, AM4, AM5, PU4 et PU5 en fonction du temps.	103
Figure 3-17 : Teneur en eau moyenne des échantillons Bloc7 et Bloc8 en fonction du temps.	103

Figure 3-18 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes E4 et E5 après rupture (Époxy – Sikadur 30).	105
Figure 3-19 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes bloc 7 et bloc 8 après rupture (Époxy – Sikadur 330).	105
Figure 3-20 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes AM4 et AM5 après rupture (acrylique modifiée).	106
Figure 3-21 : Photos des faciès de rupture des éprouvettes PU4 et PU5 après rupture (polyuréthane bi-composante).	106
Figure 3-22 : Capacités ultimes moyennes avant vieillissement (état initial) et après un an de vieillissement pour les trois types de colle.	106
Figure 3-23 : Déformations de l'échantillon bloc7 pendant l'essai juste avant rupture (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} .	108
Figure 3-24 : Déformations de l'échantillon AM4 pendant l'essai juste avant rupture (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} .	109
Figure 4-1 : Test d'imbibition sur échantillon de bois massif/mortier collés. Le bois est en contact à la base avec 3 à 5 mm d'eau.	114
Figure 4-2 : Tests de chargement sous humidité relative H_R sur un échantillon de bois massif/mortier collés.	114
Figure 4-3 : Effet de la diffusion par capillarité de l'eau lors d'un test d'imbibition visible par les niveaux de gris du bois suivant 3 cas : (a) cas sans peinture d'un assemblage bois d'épicéa/mortier, (b) cas avec fine couche de peinture laissant légèrement apercevoir à travers la structure du bois, en image noir et blanc d'un assemblage bois d'épicéa/mortier (c) cas avec peinture épaisse, image noir et blanc d'un échantillon de bois seul.	115
Figure 4-4 : (a) Mesures au palmer des déformations X globales. (b) Dispositif expérimental des mesures de déplacements provoqués par les déformations locales en surface par la technique de corrélation d'images.	116
Figure 4-5 : (a) Comparaison des déformations globales mesurées à l'aide d'un palmer micrométrique après deux jours d'imbibition le long de l'axe Z de l'échantillon de bois seul, sur les quatre hauteurs Y=10 mm, 20 mm, 30 mm et 40 mm (figure 4-4a), et déformations moyennes mesurées dans le plan XY, en surface DIC présentées par un point sur le graphique. (b) Carte des déformations locales selon l'axe X obtenue par DIC après deux jours d'imbibition.	117
Figure 4-6 : Image IRM SPI d'un échantillon, moyennée sur X de bois seul testé en imbibition dans le plan YZ, obtenue après deux jours d'imbibition de l'échantillon de bois seul.	118
Figure 4-7 : Profils de teneur en eau obtenus par gammadensimétrie après deux jours d'imbibition de l'échantillon de bois. La teneur en eau de celui-ci est estimée à environ 10 % au démarrage des essais.	118
Figure 4-8 : Evolution des profils de teneur en eau dans le temps, obtenus par gammadensimétrie (a) à droite, (b) à gauche et (c) au milieu.	119
Figure 4-9 : Photo d'un échantillon de bois soumis à un test d'imbibition pour l'analyse de l'évolution des déformations libres du bois par la technique DIC.	120
Figure 4-10 : (a) Photos de l'échantillon de bois d'épicéa testés, cas n°1, cœur en haut, (b) cartes de déformations dans la direction X (à gauche) et dans la direction Y (à droite). Déformations après 24 h, 48 h, 5 jours et 12 jours d'imbibition.	121

Figure 4-11 : (a) Photos de l'échantillon de bois d'épicéa testés cas n°2, cœur au niveau de la face imbibée en bas, (b) cartes de déformations dans la direction X (à gauche) et Y (à droite). Déformations après 24 h, 48 h, 5 jours et 12 jours d'imbibition.	122
Figure 4-12 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon EH, après 12 jours d'imbibition.	123
Figure 4-13 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon EB, après 12 jours d'imbibition.	123
Figure 4-14 : Schématisation des profils de déformations observés pour le bois seul après imbibition pour (a) le cas d'un matériau supposé isotrope (b) le cas échantillon EH et (c) le cas échantillon EB.	123
Figure 4-15 : Photo d'un échantillon de bois seul utilisé pour les tests de chargement sous HR (a) épicéa, (b) douglas.	124
Figure 4-16 : Photo de l'échantillon de bois seul soumis à un test de chargement sous HR=97 % (a) vue de l'enceinte dont l'humidité est contrôlée par une solution saline saturée (b) mise en place dans l'enceinte de l'échantillon testé. Présence de verre assemblé à l'échantillon par du joint silicone pour minimiser l'entrée de l'eau selon le sens des fibres (selon la direction z).	125
Figure 4-17 : Images SPI obtenues par IRM dans les plans XY et YZ d'un échantillon de bois seul (rectangle central rouge) soumis à un test de chargement hydrique à HR=97 %. De gauche à droite : état initial à l'équilibre à HR=60 %. 2 jours après chargement, 14 jours après chargement.	125
Figure 4-18 : (a) Photos des échantillons de bois testés d'épicéa testé sous chargement HR=97 % (b) cartes de déformations dans la direction X (à gauche) et Y (à droite). Déformations à plusieurs échéances, après 24 h, 48 h, 5 jours et 14 jours de chargement hydrique.	127
Figure 4-19 : (a) Photos des échantillons de bois testés de douglas testé sous chargement HR=97 % (b) cartes de déformations dans la direction X (à gauche) et Y (à droite). Déformations à plusieurs échéances, après 24 h, 48 h, 5 jours et 14 jours de chargement hydrique.	128
Figure 4-20 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon d'épicéa, 14 jours de chargement sous HR=97 %.	129
Figure 4-21 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises (ϵ_{eq}), et (b) carte de déplacements de l'échantillon de douglas, 14 jours de chargement sous HR=97 %.	129
Figure 4-22 : Schématisation des profils de déformations observés pour le bois seul après 14 jours de chargement sous 97 % d'humidité relative (le bois n'est pas à l'équilibre hygroscopique) pour (a) le cas de l'échantillon d'épicéa testé (b) le cas de l'échantillon de douglas.	129
Figure 4-23 : Face observée par analyse d'images. Assemblage épicéa-mortier.	130
Figure 4-24 : Cartes de déformations, (a) composante XX des déformations locales, apparition d'une fissure dans le béton après 25 h d'imbibition, (b) composante YY des déformations locales, fissuration de l'interface bois-mortier observable dès 1 heure d'imbibition.	131
Figure 4-25 : (a) Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises et (b) carte de déplacements après 28 heures.	131
Figure 4-26 : Face observée par analyse d'images. Assemblage épicéa-mortier.	132
Figure 4-27 : Cartes de déformations d'un échantillon épicéa-mortier collé après 21 jours d'imbibition (a) composante XX des déformations locales, (b) composante YY des déformations.	132

Figure 4-28 : Carte de déformations équivalentes au sens de Von Mises d'un échantillon épicea-mortier après 21 jours d'imbibition. À noter près de l'interface une zone plus déformée qui correspond à la présence d'un nœud.....	132
Figure 4-29 : Essai d'imbibition sur un assemblage bois sens convexe-mortier collé avec une colle polyuréthane bi-composants (sikaflex L15) après 24 h d'imbibition (a), déformations ε_{yy} (b) déformations ε_{xx} (c) par comparaison déformations ε_{xx} d'un échantillon de bois seul dans la même configuration.....	133
Figure 4-30 : (a)Photo échantillon bois sens convexe -mortier collé avec une colle acrylique, (b) carte de déformations ε_{xx} (c) carte de déformations ε_{yy} après 10 jours d'imbibition.....	134
Figure 4-31 : (a) Photo échantillon bois sens concave -mortier collé avec une colle acrylique, (b) carte de déformations ε_{xx} (c) carte de déformations ε_{yy} après 10 jours d'imbibition.....	134
Figure 4-32 : Faces observées par DIC (a) échantillon bois épicea-mortier collé, sens convexe, (b) bois épicea-mortier, sens concave.....	135
Figure 4-33 : (a) carte de déplacements et (b) carte de déformations ε_{yy} d'un échantillon épicea-mortier époxy sens concave, après 14 jours de chargement sous 97 % d'humidité relative, pas de décollement observable à l'interface.....	136
Figure 4-34 : Carte de déformations ε_{xx} d'un échantillon épicea-mortier-époxy sens convexe, (a) après 7 jours de chargements hydrique, apparition des premières fissures dans le mortier, (b) 10 jours après le chargement hydrique, évolution importante des fissures dans le mortier.	136
Figure 4-35 : Représentation des deux points suivis dans le temps par la technique de corrélation d'images.	137
Figure 4-36 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le mortier) et B (dans le bois) proches de l'interface pour l'échantillon épicea-mortier-époxy, sens convexe.....	137
Figure 4-37 : (a) carte de déplacements, cartes de déformations locales (b) : composante XX des déformations et (c) composante YY des déformations. d'un échantillon épicea-mortier sens concave, après 25 jours de chargement sous HR=97 %.	138
Figure 4-38 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le mortier) et B (dans le bois) proches de l'interface épicea-mortier sens concave. Début des essais après une période de maturation du béton de 28 jours minimum.	139
Figure 4-39 : Photos (a) échantillon bois épicea-BFUP collé avec Sika 32LP, cernes convexes, (b) bois épicea-BFUP collé, cernes concaves, (c) échantillon bois douglas-BFUP collé.....	140
Figure 4-40 : Échantillon épicea-BFUP sens convexe après 12 jours de chargement sous HR=97 %, cartes obtenues juste après fissuration (a) déformations ε_{xx} , (b) déformations ε_{yy} , (c) déformations ε_{eq} et (d) déplacements.	142
Figure 4-41 : Représentation des deux points suivis dans le temps par la technique de corrélation d'images pour l'échantillon épicea-BFUP avec le cœur du bois au niveau de l'interface collée.	143
Figure 4-42: Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le BFUP) et B (dans le bois) proches de l'interface comme représentés en figure 4-32 pour l'échantillon épicea-BFUP. Début des essais après une période de maturation du béton de 28 jours minimum.	144
Figure 4-43 : Évolution des déformations ε_{xx} au point A des échantillons épicea-mortier et épicea-BFUP.	144

Figure 4-44 : Fenêtres observées par DIC de l'échantillon épicea-BFUP sens convexe.	145
Figure 4-45 : Cartes de déformations ε_{xx} , échantillon épicea-BFUP sens convexe, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 11 représentées figure 4-43.	146
Figure 4-46 : Cartes de déformations ε_{yy} , échantillon épicea-BFUP sens convexe, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 11 représentées figure 4-43.	146
Figure 4-47 : Échantillon épicea-BFUP sens concave après 21 jours de chargement sous HR=97 %, (a) carte de déformations ε_{xx} , (b) carte de déformations ε_{yy} , (c) carte de déformations ε_{eq} et (d) carte de déplacements.	148
Figure 4-48 : Représentation des deux points A et B suivis dans le temps pour l'échantillon épicea-BFUP sens concave par DIC.	149
Figure 4-49 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le BFUP) et B (dans le bois) proches de l'interface pour l'échantillon épicea-BFUP sens concave.	149
Figure 4-50 : Évolution des déformations ε_{xx} au point A (dans le matériau cimentaire) des échantillons épicea-mortier et épicea-BFUP sens concave.	150
Figure 4-51 : Fenêtres observées par DIC de l'échantillon épicea-BFUP sens concave.....	150
Figure 4-52 : Cartes de déformations ε_{xx} , échantillon épicea-BFUP sens concave, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 12 représentées figure 4-50.	151
Figure 4-53 : Cartes de déformations ε_{yy} , échantillon épicea-BFUP sens concave après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 12 représentées figure 4-50.	151
Figure 4-54 : L'échantillon douglas-BFUP collé après 30 jours de chargement sous HR=97 % : (a) carte de déformations ε_{xx} , (b) carte de déformations ε_{yy} , (c) carte de déformations ε_{eq} et (d) carte de déplacements.	152
Figure 4-55 : Représentation des deux points A et B suivis dans le temps pour l'échantillon épicea-BFUP sens concave.par DIC.	153
Figure 4-56 : Courbe représentant l'évolution des déformations (a) ε_{xx} (b) ε_{yy} et (c) ε_{xy} dans le temps au niveau des points A (dans le BFUP) et B (dans le bois) proches de l'interface comme représentés en figure 4-54 pour l'échantillon épicea-BFUP collé avec le cœur du bois en bas, au niveau de la face inférieure.	154
Figure 4-57 : Fenêtres observées par DIC de l'échantillon douglas-BFUP.	155
Figure 4-58 : Cartes de déformations ε_{xx} , échantillon douglas-BFUP après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 14.....	156
Figure 4-59 : Cartes de déformations ε_{yy} , échantillon douglas-BFUP, après 21 jours de chargement hydrique, (a) fenêtre 1, (b) fenêtre 3, (c) fenêtre 7 et (d) fenêtre 14.....	156
Figure 4-60 : Cartes de déformations ε_{yy} , échantillon douglas-BFUP après 9 h de chargement hydrique (fenêtre 3).	157
Figure 4-61 : Face observée par DIC de l'échantillon épicea sens convexe avec rainures –BFUP.	158
Figure 4-62 : Cartes de déformations locales de l'échantillon épicea sens convexe avec rainures (après 12 jours de chargement sous HR=97 % (a) ε_{xx} , (b) ε_{yy}	159

Figure 4-63 : (a) Déformations équivalentes au sens de Von Mises et (b) carte de déplacements après 12 jours de chargement hydrique de l'échantillon épicea sens convexe avec rainures.	159
Figure 4-64 : Échantillon douglas toutes lamelles-BFUP.	160
Figure 4-65 : Cartes de déformations locales de l'échantillon douglas toutes lamelles-BFUP collé, après 30 jours de chargement sous HR=97 % (a) composante XX des déformations, (b) composante YY des déformations.	161
Figure 4-66 : Carte des déformations équivalentes au sens de Von Mises et (b) carte de déplacement de l'assemblage douglas toutes lamelles-BFUP à 30 jours de chargement hydrique.	162
Figure 5-1 : Conditions aux limites et de chargements hydriques imposées.	170
Figure 5-2 : Géométrie et maillage. a) bois seul, b) assemblage bois-béton.	171
Figure 5-3 : (a) Photo de l'échantillon d'épicéa utilisé pour les essais, (b) géométrie et maillage.	174
Figure 5-4 : Comparaison des cartes de déformations ϵ_{xx} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours de l'épicéa.	175
Figure 5-5 : Comparaison des cartes de déformations ϵ_{yy} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours de l'épicéa.	176
Figure 5-6 : (a) Carte de déformations ϵ_{xx} , (b) carte de déformations ϵ_{yy} de l'épicéa après 219 jours de chargement hydrique (état d'équilibre).	177
Figure 5-7 : (a) Photo de l'échantillon de douglas utilisé pour les essais, (b) géométrie.	177
Figure 5-8 : Comparaison des cartes de déformations ϵ_{xx} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours du douglas.	178
Figure 5-9 : Comparaison des cartes de déformations ϵ_{yy} numériques et expérimentales à 1, 2, 5 et 14 jours du douglas.	179
Figure 5-10 : (a) Carte de déformations ϵ_{xx} , (b) Carte de déformations ϵ_{yy} du douglas après 300 jours de chargement hydrique (état d'équilibre).	180
Figure 5-11 : Essais de la série 3 – géométries et maillages.	181
Figure 5-12 : Cas assemblage épicea/BFUP orientation convexe des cernes après 12 jours de chargement. (a) carte de déformations numérique ϵ_{xx} , (b) carte de déformations numérique ϵ_{yy} , (c) carte de déformations expérimentale ϵ_{xx} , (d) carte de déformations expérimentale ϵ_{yy}	182
Figure 5-13 : Cas assemblage épicea/BFUP orientation concave des cernes après 21 jours de chargement. (a) carte de déformations numérique ϵ_{xx} , (b) carte de déformations numérique ϵ_{yy} , (c) carte de déformations expérimentale ϵ_{xx} , (d) carte de déformations expérimentale ϵ_{yy}	183
Figure 5-14 : Cas assemblage douglas/BFUP après 30 jours de chargement. (a) carte de déformations numérique ϵ_{xx} , (b) carte de déformations numérique ϵ_{xx} , (c) carte de déformations expérimentale ϵ_{yy} , (d) carte de déformations expérimentale ϵ_{yy}	183
Figure 5-15 : Zone d'observation des contraintes S_{xx} dans le BFUP, proche de l'interface.	184
Figure 5-16 : Profil de contraintes S_{xx} induites dans le béton, le long de l'axe x proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique pour les cas épicea convexe-BFUP, épicea concave-BFUP et douglas incliné-BFUP.	185
Figure 5-17 : Profil de contraintes S_{xx} induites dans le béton, le long de l'axe x proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique pour les cas épicea concave-BFUP, épicea incliné-BFUP.	186
Figure 5-18 : Zone d'observation des contraintes S_{yy} dans le bois, proche de l'interface.	186
Figure 5-19 : Zone d'observation des contraintes S_{yy} dans la colle.	187

Figure 5-20 : (a) Profil de contraintes S_{yy} induites dans le bois, (b) profil de contraintes S_{yy} dans la colle le long de l'axe X proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique.	188
Figure 5-21 : Profil de contraintes S_{xy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x proche de l'interface après 30 jours de chargement hydrique.	189
Figure 5-22 : Photo structure mixte bois-béton – tablier NR2C.....	191
Figure 5-23 : (a) Géométrie, dimension et maillage utilisé, (b) conditions aux limites et initiales.....	192
Figure 5-24 : Schématisation des deux configurations étudiées (a) sens convexe et (b) sens concave.....	192
Figure 5-25 : Humidité relative calculée dans le bois (en relation avec la teneur en humidité du bois) aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours.	193
Figure 5-26 : Contraintes S_{xx} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens convexe.	194
Figure 5-27 : Contraintes S_{xx} dans le béton, proche de l'interface le long de l'axe X à 10, 30, 90 et 300 jours, cas sens convexe.....	195
Figure 5-28 : Contraintes S_{yy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens convexe.	196
Figure 5-29 : Profil de contraintes S_{yy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens convexe.	197
Figure 5-30 : Contraintes S_{xy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens convexe.	198
Figure 5-31 : Profil de contraintes S_{xy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens convexe.	199
Figure 5-32 : Contraintes S_{xx} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens concave.	200
Figure 5-33 : Contraintes S_{xx} dans le béton, proche de l'interface le long de l'axe X à 10, 30, 90 et 300 jours, cas concave.....	201
Figure 5-34 : Contraintes S_{yy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens concave.	202
Figure 5-35 : Profil de contraintes S_{yy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens concave.	203
Figure 5-36 : Contraintes S_{xy} calculées aux échéances suivantes : (a) 10 jours, (b) 30 jours, (c) 90 jours et (d) 300 jours, cas sens concave.	204
Figure 5-37 : Profil de contraintes S_{xy} induites (a) dans le bois proche de l'interface et (b) dans la colle le long de l'axe x après 10, 30, 90 et 300 jours de chargement hydrique, cas sens concave.	205

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Ordres de grandeur des caractéristiques élastiques de feuillus et des résineux mesurés à 12 % de teneur en eau (Guitard & El Amri, 1987).	26
Tableau 1-2 : Classes de résistance pour (a) bois massif résineux définies en NF EN 338.	27
Tableau 1-3 : Classes de résistance de bois lamellés-collés définies en NF EN1194.	27
Tableau 1-4 : Caractéristiques mécaniques des différents bétons existants.	32
Tableau 1-5 : Caractéristiques des résines structurales.	39
Tableau 2-1 : Propriétés mécaniques des bois étudiés (épicéa et douglas) données par la norme NF P 21-400 pour les lamellés-collés.	55
Tableau 2-2 : Densités et paramètres d'élasticité de l'épicéa et du douglas pour une teneur en eau $h=12\%$ (<i>Wood HandBook, 1999</i>).	56
Tableau 2-3 : Coefficients de diffusion en fonction de l'intervalle d'humidité relative ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$).	64
Tableau 2-4 : Coefficients de dilatation mesurés dans les trois directions r , t et l pour les bois d'épicéa et de douglas.	66
Tableau 2-5 : Propriétés des colles utilisées à la température ambiante.	68
Tableau 2-6 : Propriétés des bétons utilisés.	69
Tableau 2-7 : Tests d'imbibition : récapitulatif des essais réalisés.	73
Tableau 2-8 : Tests d'humidification sous $HR=97\%$: récapitulatif des essais réalisés.	75
Tableau 2-9 : Caractéristiques des images.	88
Tableau 3-1 : Modes de ruptures et capacités ultimes, essais préliminaires (série 0).	96
Tableau 3-2 : Récapitulatif des propriétés des résines testées.	98
Tableau 3-3: Récapitulatif des échantillons Push-Out et stockage.	100
Tableau 3-4: Principaux résultats des essais Push-Out pour les quatre adhésifs avant vieillissement.	101
Tableau 3-5 : Principaux résultats des essais Push-Out pour les quatre adhésifs après vieillissement.	105
Tableau 5-1 : Modules d'élasticité de l'épicéa en fonction de H_R	171
Tableau 5-2 : Modules d'élasticité du douglas en fonction de H_R	172
Tableau 5-3 : Coefficients de poisson de l'épicéa et du douglas.	172
Tableau 5-4 : Valeurs de (psat. Dp0a) intégrées dans le calcul pour l'épicéa et le douglas dans les directions R, T et L.	172
Tableau 5-5 : Valeurs des coefficients de dilatations hydriques des bois d'épicéa et de douglas en fonction de H_R	173
Tableau 5-6 : Données béton et résine époxy.	173